

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA.
RECINTO UNIVERSITARIO PEDRO ARÁUZ PALACIOS.
FACULTAD DE TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN.**

**TRABAJO MONOGRÁFICO PARA
OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL:**

***EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES EN EL TRAMO DE CARRETERA
EMPALME MALPAISILLO – EMPALME SAN ISIDRO.***

“REVISIÓN DEL PROCEDIMIENTO EN EL CÁLCULO DE EJES EQUIVALENTES

ELABORADO POR:

- **Br. Karen Patricia Ocampos Salmerón.**
- **Br. Luis Carlos Osorio Tórrez.**

TUTOR:

Msc. Ing. Douglas Méndez Talavera.

Managua, Nicaragua.

Junio, 2011

I. INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial es fundamental para el desarrollo de la economía de un país, por lo cual se hace indispensable contar con carreteras que permitan una excelente comunicación entre los poblados.

Actualmente en Nicaragua, la infraestructura vial está experimentando un deterioro prematuro en algunos proyectos ejecutados por el Ministerio de Transporte e Infraestructura, ya sea por efecto de las condiciones ambientales y/o sobrecarga, entre otras causas, lo cual genera grandes pérdidas económicas al país, debido a que los mantenimientos se tienen que realizar en lapsos de tiempo más cortos que los estipulados en el diseño, para conservar en buen estado las vías.

En nuestro país el método utilizado para el diseño de estructuras de pavimento corresponde al normado por la AASTHO - 93, el cual toma en cuenta el efecto del daño que produce el paso de un eje cargado, para que la vía resista un determinado número de repeticiones de cargas aplicadas durante su vida útil.

En este estudio se pretende demostrar la importancia que conlleva hacer una estimación adecuada de ejes equivalentes de carga, debido a que si estas estimaciones no se hacen de manera correcta, los resultados se verán reflejados en el comportamiento de las vías, con deterioros prematuros, y en la inversión que éstas requieran, con mantenimientos innecesarios o bien así con un gasto excesivo en la construcción de las mismas.

Por lo anteriormente mencionado, nos hemos destinado a la tarea de elaborar nuestra tesis monográfica con el tema ***“Revisión del Procedimiento en el Cálculo de Ejes Equivalentes en el Diseño de Pavimentos Flexibles en el Tramo de Carretera Empalme Malpaisillo – Empalme San Isidro”***. Para analizar mediante este estudio la manera en que los Ejes Equivalentes de Carga (ESAL's) podrían incidir en el comportamiento de la infraestructura vial en estudio.

La sección de carretera en la que se desarrolla este estudio, se encuentra ubicada entre los Departamentos de León y Matagalpa con una longitud total de 72.06

Km., la que se inicia en el Empalme de Malpaisillo, atravesando los municipios de Los Zarzales, El Jicaral, La Cruz de la India y Las Mangas, finalizando en el Empalme de San Isidro.

Para este propósito se recopiló el diseño existente del tramo Empalme Malpaisillo – Empalme San Isidro, el cual permitió conocer el procedimiento empleado en el cálculo de los ejes equivalentes al igual que el número de ESAL'S utilizados en el diseño, la base de datos de tráfico, la base de datos de la estación de pesaje, así como la realización de pesaje de los diferentes tipos de vehículos cargados, que transitan por la vía, no incluidos en el Diagrama Permisible de Carga Nicaragüense, esta información fue clave, ya que con ella se calcularon los Ejes Equivalentes de Carga existentes en el tramo en estudio, y éstos se compararon con los estimados en el diseño.

II. ANTECEDENTES

2.1. Extensión de la Red Vial de Nicaragua.

Las vías de transporte han ocupado un lugar preponderante y fundamental en el marco de la economía nacional, desde el año de 1939 en que se dieron los primeros pasos para la construcción de la Carretera Panamericana, se incrementó y agilizó el movimiento vehicular tanto al interior como al exterior del país, produciéndose un inmediato aumento en el traslado de productos así como un mayor movimiento de usuarios.

Su mayor auge se registró durante las décadas de los años 50 y 60, pasando de 590 Km. de carreteras (pavimentadas y no pavimentadas) en 1950 a un total de 11,201 Km. en 1969, es decir que se construyeron 10,021 Km. en ese período, de los cuales 906 Km. fueron carreteras pavimentadas.

Actualmente la Red Vial Nacional, está constituida por 21,975.40 Km. de carretera, de los cuales según su superficie de rodamiento 2,070.11 Km. son de Asfalto, 474.86 Km. Adoquinado, 3,905.12 Km. Revestida, 8,335.13 Km. Todo Tiempo, 7,182.62 Km. Estación Seca y 7.53 Km. de Concreto Hidráulico.

2.2. Antecedentes del Tramo en Estudio.

En los años 1950-1960 se construye la carretera León - San Isidro, con el fin de unir la Región Norte del País con la Región Occidente (León, Chinandega, Corinto).

Al pasar de los años se fue presentando un incremento vehicular y por ende aumento de las cargas transportadas, debido a lo anteriormente mencionado y al efecto de las condiciones ambientales, la carretera fue presentando fallas que afectaban a los usuarios.

“Para el año 2008 cuando se inauguró el tramo Telica – Malpaisillo (debido a su rehabilitación), la representante del BID, Mirna Leivano, anunció que el BID dispondría

de 5 millones de dólares para el mantenimiento y rehabilitación del tramo Malpaisillo-San Isidro”¹.

En el año 2009 se logra realizar la ejecución del mejoramiento de este tramo, no se ejecutaron los niveles del diseño completo, puesto que solo se hizo un mantenimiento mayor.

En la actualidad, el MTI aprobó el Rediseño de la Carretera Malpaisillo- San Isidro realizado por el consorcio PROINTEC y EDICRO, S.A. El proyecto consiste en hacer una revisión de todas las especialidades involucradas, enfatizando en proveer una nueva estructura de pavimento con la dotación completa de un sistema de drenaje mayor y menor, a fin de conseguir una mayor funcionabilidad y servicio.

La región donde se desarrolla la obra corresponde al sector noroccidental del país, una zona densamente poblada en la que se desarrollan actividades como ganadería y agricultura. Se observa la presencia de cultivos menores, permanentes y temporales. En el caso de cultivos permanentes, se destaca el cultivo del arroz, en el caso de cultivos temporales se destaca el cultivo de frijoles y ajonjolí.

Es importante mencionar, que este tramo de carretera se encuentra dentro del plan de integración del Plan Puebla- Panamá, para la competitividad de la zona III del País. Que comprende los Departamentos de Jinotega, Matagalpa y León. Propiciando de esta manera una carretera que ofrezca mejor nivel de servicio, seguridad, y menores costos de operación vehicular.

2.3. Antecedentes de la Prueba AASHTO 93.

2.3.1. Antecedentes de la Prueba AASHTO.

La prueba experimental de pavimentación AASHO se llevó a cabo gracias a la organización que ahora conocemos como AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) para estudiar el comportamiento de las

¹ Malpaisillo recibe Carreteras. Disponible en: www.conamornicaragua.org.ni

estructuras de pavimentos con espesores conocidos, bajo cargas móviles de magnitudes y frecuencia conocidas y bajo el efecto del medio ambiente.

La investigación inició en 1951, la construcción de los seis circuitos comenzó en 1956 cerca de Ottawa, Illinois. Desde Octubre de 1958 hasta Noviembre de 1960 se aplicó el tráfico controlado sobre los tramos de pavimentos construidos.

El objetivo principal de la prueba consistió en determinar las relaciones significativas entre el número de repeticiones de cargas por ejes de diferentes magnitudes y configuraciones, y el comportamiento de diferentes espesores de pavimentos (flexibles y rígidos) conformados con bases y sub-bases, colocados en suelos de características conocidas.

El sitio cerca de Ottawa, seleccionado para la prueba, tiene condiciones climáticas y de suelos típicas de algunas áreas de Estados Unidos y Canadá, esto hace que la aplicación del método deba utilizarse con criterio para otras partes del mundo.

Se construyeron 6 circuitos de prueba, todos eran tramos de dos carriles y tenían la mitad del tramo en pavimento de concreto y la otra mitad en pavimento flexible. El circuito 1 se dejó sin cargas para evaluar el impacto del medio ambiente en los pavimentos. El circuito 2 se utilizó con aplicaciones de cargas de camiones ligeros. En los circuitos del 3-6 se realizaron aplicaciones de cargas con camiones pesados. Los circuitos 5-6 tuvieron idénticas configuraciones y aplicaciones de cargas.

Cada circuito consistía en dos largas carreteras paralelas conectadas en los extremos por retornos, las secciones de prueba de los pavimentos estaba localizadas en las rectas o tangentes del circuito.

Circuitos

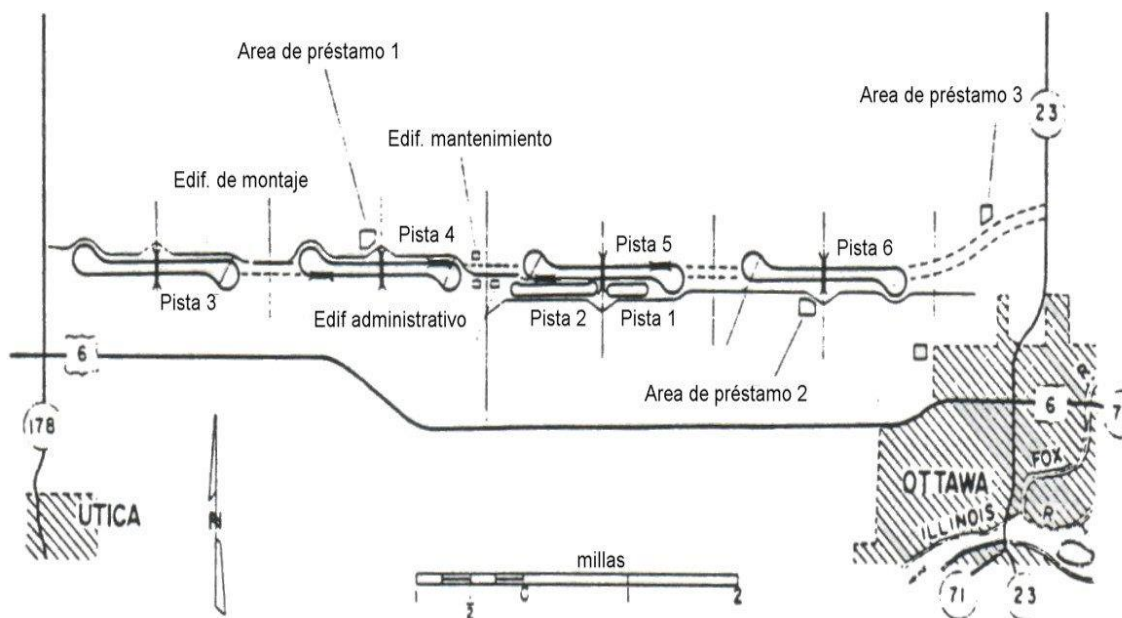


Figura 1 Circuitos para el Road Test de AASHTO
Fuente: Diseño de Pavimentos AASHTO 93. Pág. 7

El tránsito que circuló por estas pistas consistía en cargas de ejes simples que variaban entre 9 y 133 KN (2 a 30 kips) y cargas de ejes tándem que variaban entre 107 y 214 KN (24 a 48 kips).

2.4. Antecedentes del Control del Tránsito en Nicaragua.

Una de las variables más importantes en el diseño de una vía es el tránsito, pues, si bien el volumen y dimensiones de los vehículos influyen en su diseño geométrico, el número y el peso de los ejes de éstos son factores determinantes en el diseño de la estructura de pavimento.

El sistema de transporte nicaragüense ha logrado atender la demanda generada por la actividad económica, sin embargo prevalece el problema de deterioro prematuro de la infraestructura vial. Lo que hace necesario contar con métodos y criterios que permitan proyectar las repeticiones de Ejes Equivalentes que actúan sobre el pavimento y comprobar si éstos son acordes a los esperados en el diseño.

La compleja situación en lo referente a “la diversidad en las características físicas de los vehículos de transporte de carga, trae como consecuencia un amplio espectro de ejes de carga, con diferentes espacios entre llantas y distintas presiones de inflado, lo que origina una gama de esfuerzos y deformaciones aplicados a un determinado punto de la estructura”², esto sumado a un inesperado aumento en el paso de ejes cargados motivó la preocupación de preservar las vías terrestres, lo que indujo a participar en las reuniones sobre conservación vial a nivel internacional.

En 1943, Nicaragua y los Estados Unidos de América, firmaron un convenio en el que se establecían limitaciones a los vehículos en lo que respecta a velocidades, dimensiones y carga máxima por ejes. Este convenio fue promulgado como Ley de la República al ser publicado en La Gaceta No. 158 del 28 de Julio de 1947 y la Ley emitida el 02 de Julio del mismo año.

En junio de 1958, en la ciudad de Tegucigalpa, República de Honduras, los países de Centroamérica ratificaron un acuerdo denominado ACUERDOS CENTROAMERICANOS SOBRE LA CIRCULACION POR CARRETERAS, tal acuerdo fue promulgado como ley en Octubre de 1959 (Gaceta N° 226 a 232 del mes de Octubre de 1959), es a partir de aquí que nace el Sistema de Integración Económica de Centroamérica (SIECA).

Cada país ha generado sus propias tablas de clasificación vehicular y en el año 2001, se han estandarizado a raíz de la actualización del Acuerdo Centroamericano sobre Circulación por Carreteras, realizado por SIECA.

El Gobierno de Nicaragua a principios de la década de los 50, adquirió 22 básculas portátiles mecánicas con capacidad de 10,000 kilogramos cada una, a través del Departamento de Carreteras, ahora conocido como Dirección General de Vialidad, con el fin de iniciar el control de pesos y dimensiones, su funcionamiento inició el 26 de Abril de 1957.

² Extraído de Alfonso Montejo Fonseca, *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*, Segunda Edición, p.15

Para esta fecha se acordó temporalmente una carga máxima en eje trasero de 25,000 libras (11,363 kilogramos) para ciertos vehículos que excedían el peso máximo permisible, pero en Mayo de 1958 tal carga se limitó a 22,000 libras (10,000 kilogramos) hasta el final de la vida útil de tales vehículos.

En 1963, debido al crecimiento del tránsito internacional y nacional, falta de control efectivo y tendencia de los transportistas a aumentar las cargas por viaje, se adquirieron e instalaron dos básculas fijas marca TOLEDO, las cuales fueron ubicadas en los puestos fronterizos de El Espino y Peñas Blancas.

Al año siguiente se instalaron tres más en puntos obligados de cruce que fueron: Chilamatillo, en el kilómetro 31 de la Carretera Norte, Las Piedrecitas, Kilómetro 6 Carretera Sur y Paso Caballos, kilómetro 146 Carretera Chinandega - Corinto. En 1990 se reactivaron las básculas en los puntos fronterizos con Costa Rica y Honduras (destruidas en 1983 por conflictos de guerra).

Entre 1985 y 1995 el parque automotor pasó de 118,335 a 248,642 vehículos, por consiguiente aumentó la congestión vehicular, la tasa de accidentes de tránsito y las cargas que el tránsito impone en los pavimentos.

Actualmente el MTI, cuenta con un total de 9 básculas (de las cuales 8 son básculas fijas y 1 es báscula móvil) que se muestran a continuación:



Figura 2. Sistema de Básculas en Nicaragua.
Fuente: mti.gob.ni/vialidad/doc/Mapa_Basculas.ppt

Para la conservación de las carreteras es de vital importancia realizar un efectivo control y regulación de pesos y dimensiones de los vehículos de carga tanto nacionales como internacionales que circulan por las vías.

III. JUSTIFICACIÓN

Para la elaboración de nuestra tesis monográfica nos hemos dispuesto realizar la ***Revisión del Procedimiento en el Cálculo de Ejes Equivalentes en el Diseño de Pavimentos Flexibles en el Tramo de Carretera Empalme Malpaisillo – Empalme San Isidro***, por ser este un tramo de mucha importancia para el país, al dar comunicación directa entre la Región Occidente y Región Norte, actualmente dicho tramo se encuentra en buen estado, debido a que en el 2009 se le realizó un mantenimiento mayor.

En la mayoría de los países centroamericanos se están haciendo esfuerzos para establecer controles de pesos y dimensiones, para normar la circulación del tránsito pesado y regular de esta forma las cargas con las cuales se diseñan carreteras y puentes. El método AASHTO 1993 presenta el procedimiento para determinar Ejes Equivalentes para el diseño de pavimentos, este procedimiento es utilizado por los países centroamericanos, sin embargo en muchos casos existe una falta de controles actualizados de tránsito y en algunos casos no llenan los requisitos técnicos para ayudar al diseñador a establecer proyecciones futuras, así como los factores para las conversiones necesarias, utilizados en los diseños de los pavimentos.

Al realizar nuestra tesis, determinaremos si a través del procedimiento efectuado por el diseñador, en el cálculo de los Ejes Equivalentes, se logran reflejar adecuadamente las cargas que circulan sobre la vía en estudio, debido a que de éstas dependerá en gran medida efectuar un adecuado diseño, para que la carretera soporte las cargas a las que será sometida.

IV. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

- Realizar la Revisión del Procedimiento en el Cálculo de Ejes Equivalentes en el Diseño de Pavimentos Flexibles del tramo de carretera Empalme Malpaisillo-Empalme San Isidro.

4.2. Objetivos Específicos

- Determinar el Tipo de Eje que causa más daño a la estructura de pavimento de la sección en estudio.
- Analizar y Determinar el efecto causado por Ejes Cargados no incluidos en el diseño del Pavimentos.
- Determinar la importancia que conlleva el realizar un adecuado Cálculo de los Ejes Equivalentes, en el diseño de Pavimentos Flexibles.
- Establecer parámetros que puedan ayudar al diseñador en el cálculo y proyección de los ejes equivalentes de una manera más exacta.

V. MARCO TEÓRICO

5.1. Pavimento.

a. Definición Estructural.

La superestructura de una vía, construida sobre la sub-rasante, y compuesta normalmente por la sub-base, la base y la capa de rodamiento, cuya función principal es soportar las cargas rodantes y transmitir los esfuerzos al terreno, distribuyéndolos en tal forma que no se produzcan deformaciones perjudiciales, así como proveer una superficie lisa y resistente para los efectos del tránsito.

b. Definición Funcional.

La parte superior de una carretera, pista de aterrizaje, o estacionamiento y cuyo objetivo es servir al tráfico de una manera segura, cómoda, eficiente, permanente y económica.

5.1.1. Diseño de Pavimento.

El diseño de pavimentos, será "el proceso de determinación de una combinación de tipos de materiales, y espesores de capas construidas con tales materiales, que garanticen tanto el comportamiento estructural de su conjunto, cuando es sometido a los efectos impuestos por las variables actuantes sobre esta estructura, como el cumplimiento de las funciones para las cuales ha sido diseñado"³.

5.2. Tipos de Pavimentos.

Históricamente los pavimentos han sido divididos en dos tipos:

- a. Pavimentos Flexibles
- b. Pavimentos Rígidos

³ Extraído de Apuntes de Pavimentos, Volumen 1, Ing. Gustavo Corredor M., Octubre 2006

Es indudable que tal división proviene de una simplificación de todas las posibilidades de definiciones, pero representa verdaderamente la imagen que cualquier usuario recibe de los tipos de superficies sobre la que él transita.

El siguiente esquema muestra la forma en que las cargas actúan sobre los diferentes tipos de pavimentos.

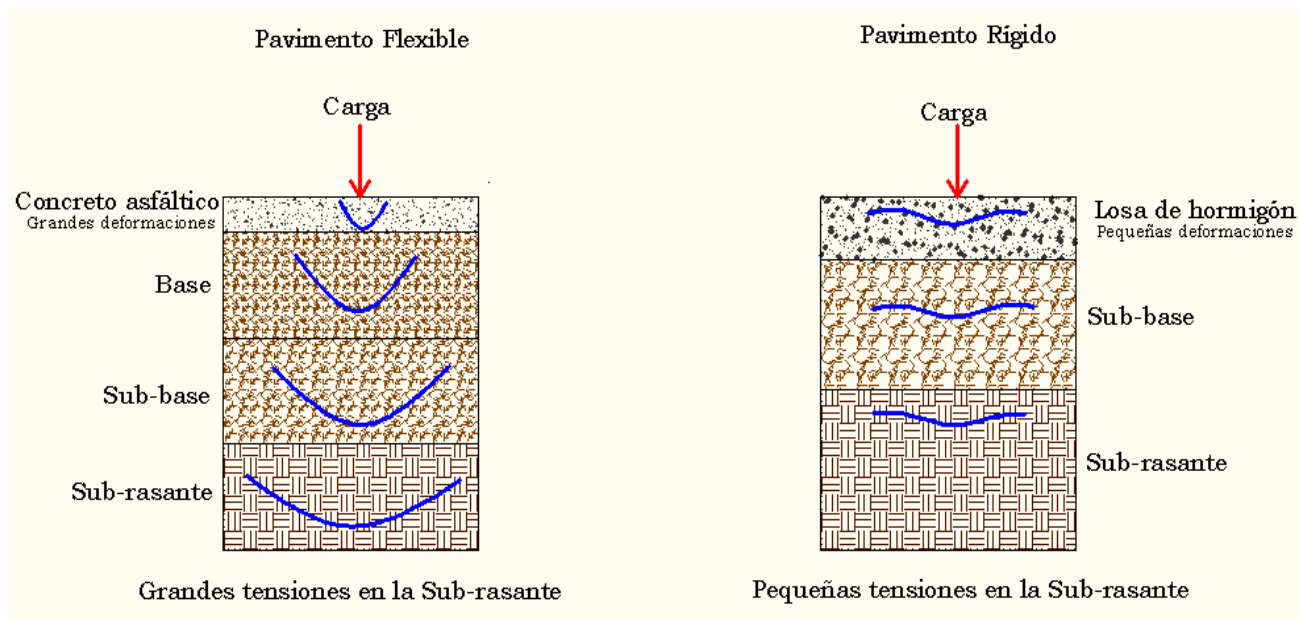


Figura 3. Esquema del Comportamiento de Pavimentos Flexibles y Rígidos.
Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, pág. 93.

5.2.1. Pavimento Flexible.

Los pavimentos flexibles se caracterizan por ser sistemas multicapas con las capas de mejor calidad cerca de la superficie, donde las tensiones son mayores. La capa superior es de concreto asfáltico.

Un pavimento flexible trabaja distribuyendo la carga hasta que llegue a un nivel aceptable para la sub-rasante. Por debajo de la capa de concreto asfáltico se coloca una base que puede ser de piedra partida, grava bien graduada o materiales estabilizados (con cemento, cal o asfalto). Por debajo de esta base se coloca una capa de menor calidad denominada sub-base.

Las principales características del pavimento flexible son las siguientes:

- ✓ La capacidad estructural del pavimento es proporcionada por las capacidades de aceptación y distribución de cargas de cada una de las capas que conforman la estructura.
- ✓ Son contruidos, al menos la capa superior, con material asfáltico.
- ✓ Variaciones pequeñas del suelo de fundación tienen gran incidencia en la capacidad estructural del pavimento.
- ✓ Las propiedades de las mezclas, afectan, aún cuando en menor grado, la resistencia del conjunto multicapa.

La figura 4 muestra la carga de una rueda (W), que es transmitida a la superficie del pavimento a través del caucho del vehículo, y que resulta en una presión unitaria vertical aproximadamente uniforme, identificada como P_0 . Cada capa del pavimento absorbe parte de esta presión, y distribuye la presión restante sobre la capa inferior de tal manera que este esfuerzo se ve reducido a un valor menor al esfuerzo resistente de la capa subyacente.

La selección adecuada de los materiales y/o mezclas, y de los correspondientes espesores, resultará en que el esfuerzo aplicado sobre la sub-rasante (P_1), será suficientemente pequeño para ser soportado fácilmente por el material de fundación.

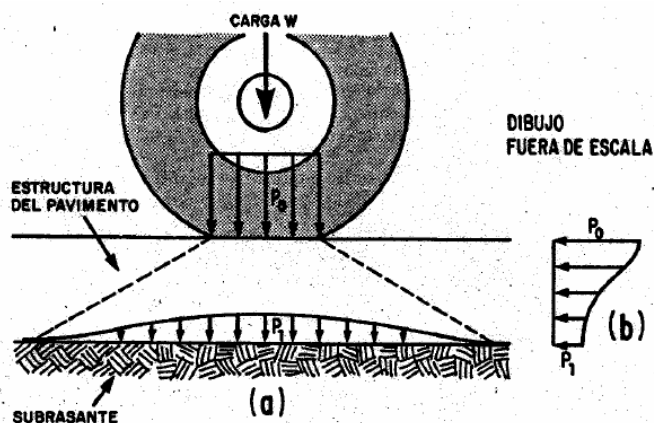


Figura 4. Distribución de las cargas de los neumáticos a través de la estructura de un pavimento flexible.

Fuente: Apuntes de Pavimentos. Volumen 1. Pág. 10

Cada vez que un vehículo pasa sobre una sección de un pavimento, éste sufre una deformación, o deflexión, que es recuperable; es decir es una deformación elástica. La Figura 5 representa como la carga del vehículo (W) deforma levemente la estructura del pavimento, causando esfuerzos de tracción y compresión dentro del mismo. Las capas asfálticas tienen resistencia a la tracción y compresión para soportar los esfuerzos impuestos. Las capas granulares de sub-base y/o base sólo resisten esfuerzos de compresión.

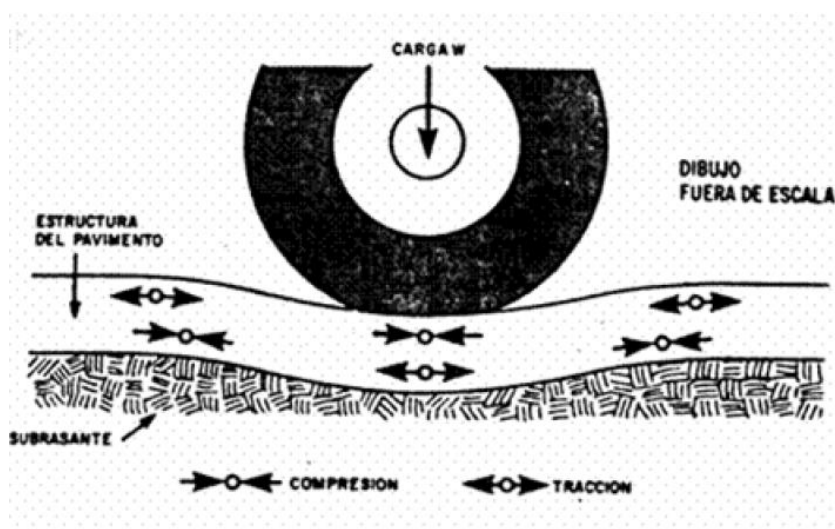


Figura 5. Esfuerzos de tracción y compresión como resultado del paso de una carga sobre un pavimento flexible.

Fuente: Apuntes de Pavimentos. Volumen 1. Pág. 11

5.2.2. Pavimento Rígido.

Es aquel que distribuye la carga sobre un área relativamente grande del suelo por la rigidez y alto módulo de elasticidad de sus componentes, una gran parte de la capacidad estructural la proporciona la capa superior, la que es construida de concreto-cemento, cuya resistencia influye notablemente en su comportamiento, aunque existiesen pequeñas variaciones en el suelo de fundación, estas tendrían poca incidencia en la capacidad estructural del pavimento.

En un pavimento rígido, debido a que se produce una buena distribución de las cargas, da como resultado tensiones muy bajas en la sub-rasante en comparación con un pavimento flexible, donde el concreto asfáltico, al tener menor rigidez, se deforma y transmite tensiones mayores en la sub-rasante.

Debido a la rigidez y alto módulo de elasticidad del hormigón, los pavimentos rígidos basan su capacidad portante en la losa de hormigón más que en la capacidad de la sub-rasante.

5.2.3. Otro Tipo de Pavimento.

Aunque en la clasificación de pavimentos solamente existen rígidos y flexibles es muy importante mencionar que hay un tipo de pavimento que se utiliza con mucha frecuencia como lo es el pavimento semi-rígido.

Pavimento Semi-rígido: es un embaldosado que permite grandes deflexiones, cuyos elementos superficiales pueden ser: piedra, ladrillo o concreto como es el caso de los adoquines de concreto.

Estudios realizados han demostrado que los pavimentos de adoquín exhiben un comportamiento similar a los de pavimentos flexibles tradicionales, fundamentalmente en lo que se refiere a las propiedades de distribución de tensiones y desarrollo de deformaciones.

Es por ello que el modo de falla típico en este tipo de pavimento (adoquín) es la acumulación de deformaciones permanentes provocado por la repetición de cargas que sobrepasan la capacidad elástica de las capas del pavimento.

5.3. Elementos de la Estructura del Pavimento Flexible.

5.3.1. Sub-rasante.

Es el ancho total de la vía que constituye la fundación para el pavimento, hombrillos y zonas de estabilización. Este término realmente es compartido en los aspectos de diseño geométrico: en ellos se refiere al plano que separa la

infraestructura y superestructura del pavimento; y en el diseño de pavimentos: en el cual se refiere a los últimos centímetros (generalmente 50,0 cm) del relleno o corte del movimiento de tierras, que sirven de soporte a la estructura capaz de recibir y reducir las cargas del pavimento. **La sub-rasante no forma parte del pavimento, pero es una variable fundamental en su determinación.**

5.3.2. Sub-base.

Parte de la estructura del pavimento construida directamente sobre la sub-rasante, y que sirve de soporte a la base. Destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de sub-rasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la sub-base. Se utiliza además como capa de drenaje y controlador de ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares.

5.3.3. Base.

Capa, o capas, de agregados, o de suelos o agregados tratados, destinadas a distribuir las cargas provenientes del paso de los vehículos sobre la sub-base o sub-rasante de la vía, y encima de la cual se construye la capa de rodamiento.

5.3.4. Superficie de Rodadura.

Capa superior del pavimento que soporta directamente el tránsito, constituida por una o más capas. Su objetivo principal es proteger la estructura de pavimento, impermeabilizando la superficie, para evitar filtraciones de agua de lluvia que podrían saturar las capas inferiores.

5.4. Fallas en los Pavimentos Flexibles.

Todos los pavimentos siempre presentarán fallas y estas fallas suelen ser básicamente de dos tipos:

a. Falla Estructural: son aquellas fallas en las que se dan el colapso o rotura de uno o más de los componentes del pavimento y ocurren de una magnitud tal que lo hace incapaz de soportar las cargas impuestas.

b. Falla Funcional: son aquellas en donde las condiciones del pavimento causan incomodidad o inseguridad a los conductores, o se producen grandes esfuerzos sobre el vehículo al transitar sobre el pavimento. La falla funcional puede venir o no acompañada de una falla estructural.

El grado de falla de un pavimento es progresivo, sin embargo al poner en servicio una obra, ésta no debe de presentar falla alguna, pero si al paso del tiempo, es decir, ante el incremento de la aplicación de cargas y los efectos adversos de las condiciones climatológicas, estos elementos van haciendo aparecer y avanzar las fallas en un pavimento. Es importante conocer bajo que tipo puede calificarse una falla, ya sea funcional o estructural, ya que las medidas correctivas a tomar, dependerán del tipo de falla de la que se trate.

5.4.1. Causas de Fallas en Pavimento Flexible⁴.

Las causas de las fallas son comunes para ambos tipos (estructural y funcional), y pueden provenir de múltiples razones, entre ellas se mencionan las siguientes:

Sobrecarga: Estas provienen de vehículos con cargas por encima de las cargas totales permisibles, así como de mayor número de repeticiones de ejes que las estimadas y las altas presiones de contacto entre el caucho y el pavimento. Esto causará fallas prematuras en la estructura del pavimento.

Condiciones Ambientales: El efecto de las condiciones ambientales, irán deteriorando en forma progresiva e inevitable el pavimento. Puesto que muchas de las variables climáticas no pueden ser estimadas, es pobre la certeza en la predicción de su efecto sobre los pavimentos.

⁴ Extraído de Apuntes de Pavimentos, Volumen 1, Ing. Gustavo Corredor M., Octubre 2006

Construcción: Los defectos en la construcción, provocarán que los materiales utilizados en la construcción de las capas del pavimento, tengan menor calidad que las supuestas en el diseño.

La variabilidad propia de los materiales: Esto causará que los diferentes sectores del pavimento presenten niveles de calidad inferiores a los deseados.

Mantenimiento Inadecuado: Esto conduce a un desarrollo exponencial de una falla inicial que pudo haberse corregido fácilmente.

Mal Diseño: Esto puede ser causado por errores en la información de entrada al método, o mala aplicación o interpretación de los resultados de ensayos.

Todas estas fallas pueden agruparse bajo un mismo término *sub-diseño*, es decir que todas las variables estimadas que actúan sobre un pavimento, y que son consideradas en la etapa de diseño, pueden tener un comportamiento muy distinto, e impredecible, con el transcurrir del tiempo de trabajo del pavimento.

Esto se vuelve más complejo cuando no se tienen registros estadísticos confiables y permanentes acerca del desempeño de los pavimentos antes las diferentes situaciones mencionadas.

Las fallas más comunes en los Pavimentos de Mezclas Asfálticas son las siguientes:

- ✓ Piel de Cocodrilo:
- ✓ Exudación.
- ✓ Fisuras en bloques.
- ✓ Fisuras longitudinales.
- ✓ Desprendimiento y peladuras.
- ✓ Ahuellamiento.
- ✓ Fisuras transversales.
- ✓ Fisuras reflejadas.

5.5. Método AASHTO - 93 para el Diseño de Pavimentos.

En el método AASHTO los pavimentos se proyectan para que resistan determinado número de cargas durante su vida útil, por lo cual se debe de conocer el número y el tipo de vehículos que circularan por una vía, así como la intensidad de carga y la configuración del eje que la aplica. Porque es más importante el tipo de eje y su peso, que el peso del vehículo en lo que respecta al comportamiento del pavimento.

El número y composición de los ejes pesados que solicitarán al pavimento durante su periodo de diseño se determinan a partir de la siguiente información básica:

- Total de vehículos controlados de cada tipo.
- Periodo de diseño.
- Tasas de crecimiento anual acumulativo de cada tipo de vehículo.
- Tránsito medio diario anual de todos los vehículos.
- Sentido de tránsito.
- Número de carriles o pistas por sentido de tránsito.
- Porcentaje del tránsito que se canalizará sobre la pista más solicitada.
- Factores Equivalentes de Carga.

5.5.1. Tránsito

Definición: Vehículos de todo tipo, con sus respectivas cargas, considerados aisladamente o en conjunto, mientras utilizan cualquier vía.

Según la Guía AASHTO 93, la precisión del tráfico estimado influye significativamente el ciclo de vida de un pavimento, ya que el cálculo de los espesores de las capas que conforman un pavimento depende de una estimación muy importante, como lo es el número de ejes equivalentes de carga (ESAL's) a la que va a estar sometida la estructura durante su vida útil. Por otra parte al sub-estimar los ESAL's, provocaría incrementar los costos de mantenimiento periódico, ya que los

espesores de las capas superpuestas requerirán mayores grosores para satisfacer la demanda de carga y mantener un óptimo nivel de servicio en la vía.

5.5.1.1. Volumen de Tránsito: Número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados, de un carril o de una calzada, durante un periodo determinado.

5.5.1.2. Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA): Volumen promedio de tránsito en veinticuatro (24) horas, obtenido al dividir el volumen total durante un determinado tiempo, generalmente un (1) año, por el número de días del mismo período.

5.5.2. Clasificación Vehicular⁵.

El tránsito está compuesto por una gran variedad de vehículos de diferentes características y que, por lo tanto, influyen de diferentes formas en el deterioro de la estructura de pavimento. Como resulta imposible analizar cada uno de los múltiples tipos de vehículos, éstos se suelen agrupar en categorías, siendo la más general, la siguiente:

Vehículos Livianos: son todos los vehículos de dos ejes y cuatro ruedas tales como: automóviles, camionetas y camiones de dos ejes con ruedas traseras sencillas.

Vehículos Pesados de Pasajeros: son vehículos destinados al transporte público de pasajeros de cuatro, seis y más ruedas, que incluyen los microbuses pequeños (hasta de 15 pasajeros), microbuses livianos (de 25 pasajeros), y los buses medianos y grandes.

Vehículos Pesados: son todos los vehículos destinados al transporte pesado de carga mayores o iguales a tres toneladas y que tienen 6 ó más ruedas en 2, 3, 4, 5 y más ejes, estos vehículos incluyen, los camiones de dos ejes (C2), camiones C3, C2R2, y los vehículos articulados de cinco y seis ejes de los tipos (T3S2) y (T3S3), y

⁵ Extraído de Anuario de Aforos 2008. Ministerio de Transporte e Infraestructura.

otros tipos de vehículos para la clasificación de vehículos especiales, tales como vehículos agrícolas y vehículos de construcción.

Los tipos de camiones se dividen en los siguientes grupos:

- a) **Camiones unitarios:** vehículos con sistema de tracción y de carga integrados en una sola unidad.
- b) **Semi trailers:** vehículo compuesto por una unidad de tracción que no lleva carga y que arrastra una plataforma sobre la cual va la carga, y que tiene un solo grupo de ejes, ya sea simple o compuesto.
- c) **Remolques:** vehículo compuesto por un camión unitario que arrastra un componente carente de motor con eje(s) delantero(s) y trasero(s) que descansa sobre sus propios ejes (remolque).

Actualmente los camiones se clasifican de acuerdo a diferentes categorías señaladas en la Tabla B. Diagrama de Cargas Permisibles, pág. 73.

5.5.3. Tasa de Crecimiento.

Es el incremento anual del volumen de tránsito en una vía, expresado en porcentaje. Se determina en base a los datos de series históricas de las estaciones de conteo.

$$TC = \left[\left(\frac{TPDA_i}{TPDA_0} \right)^{1/n} \right] - 1 \quad \text{Ecuación N° 1}^6$$

TPDA_i: Conteo de Tráfico de año actual.

TPDA₀: Conteo de Tráfico de año base.

n: Año actual - Año base.

⁶ Extraído de Anuario de Aforos 2008. Ministerio de Transporte e Infraestructura. Pág. 22

TC: Tasa de Crecimiento.

Proyección de Tránsito: El volumen de tránsito para un año cualquiera se determina empleando la siguiente ecuación:

$$TPDA_{final} = TPDA_{inicial}(1 + TC)^n \quad \text{Ecuación N° 2}^7$$

Donde:

TPDA_{final}: Tránsito Promedio Diario Anual al Final del Periodo de Diseño.

TPDA_{inicial}: Tránsito Promedio Diario Anual al Inicial del Periodo de Diseño.

TC: Tasa de Crecimiento por cada Tipo de Vehículo.

n: Periodo de Diseño.

5.5.4. Factor de Crecimiento de Tránsito.

Es un factor que toma en cuenta la variación del volumen de tránsito en el periodo de diseño considerado, y se utiliza para determinar las cargas equivalentes acumuladas. Los valores del factor de crecimiento se presentan en Anexos A. Tabla C. Factores de Crecimiento de Tránsito, y son función de la tasa de crecimiento y del periodo de diseño (n), en años. El factor de crecimiento se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$FCT = \frac{(1 + TC)^n - 1}{TC} \quad \text{Ecuación N° 3}$$

FCT: Factor de Crecimiento de Tránsito.

TC: Tasa de Crecimiento por cada Tipo de Vehículo.

n: Período de Diseño.

⁷ Extraído de Anuario de Aforos 2008. Ministerio de Transporte e Infraestructura. Pág. 23

5.5.5. Ejes Simples Equivalentes de Carga (ESAL's).

Se define como ejes estándares equivalentes de carga al número de repeticiones de carga equivalentes a 8.2 toneladas, 18 kips ó 18,000 libras, en el carril de diseño durante la vida útil del pavimento.

Las diferentes cargas que actúan sobre un pavimento producen a su vez diferentes tensiones y deformaciones en el mismo; los diferentes espesores de pavimentos y diferentes materiales, responden de diferente manera a una misma carga por lo que las fallas serán distintas. Con el objeto de evaluar tal efecto, en un pavimento flexible, el volumen de tránsito se transforma en un número equivalente de ejes de una determinada carga, que a su vez producirá el mismo daño que toda la composición de tránsito mixto de los vehículos. Esta carga uniformizada es de 80 KN o 18 Kips, según la AASHTO, la conversión se hace a través de los Factores Equivalentes de Carga.

Cabe mencionar que el cálculo de Ejes Equivalentes de Carga, conforma solamente un parámetro de gran importancia en el diseño de carreteras. Después de este proceso se tienen que realizar otras estimaciones, por ejemplo; el módulo resiliente, confiabilidad, serviciabilidad, etc., con el objeto de que al final se determine una sección multicapa, que brinde suficiente capacidad de soporte a la estructura (determinación de los espesores de la sección estructural de la carretera), que es lo que conlleva al 100% del diseño de la vía.

5.5.6. Procedimientos para el Cálculo de Ejes Equivalentes.

a. Procedimiento Simplificado.

Sirve para hacer una rápida estimación del número de los ESAL's. Este procedimiento se llama simplificado por que usa un factor de camión promedio en el lugar de factores de camión para cada tipo de camión. La fórmula a usar es:

$$ESAL = TPDA * FCT * FDD * FDC * FC * 365 \quad \text{Ecuación N° 4}^8$$

⁸ Extraído de Diseños de Pavimentos AASHTO 93. Pág. 47

TPDA: Tránsito promedio diario anual.

FCT: Factor de crecimiento de Tránsito.

FDD: Factor de distribución por dirección. Es un factor que se aplica al TPDA para incluir cualquier variación del volumen de tránsito de camiones o cargas por Dirección.

FDC: Factor de Distribución por Carril. Es el carril con el mayor tránsito de camiones o cargas y a este se le designa como el carril de diseño.

FC: Factor de Camión.

b. Procedimiento Riguroso.

El método riguroso requiere el uso de los factores de camión para cada clase individual de camiones. Esto puede realizarse con los pesos de los vehículos y clasificación obtenida de los mismos, mediante el método de pesado en movimiento o trabajar con los datos de una estación permanente de pesaje que este ubicada en el tramo del proyecto.

5.5.7. Factores Equivalentes de Carga.

“Son valores numéricos que definen el daño que causa el paso de un vehículo, o eje determinado, sobre una sección de pavimento en una manera relativa al daño que el vehículo, o eje patrón, causa al pasar sobre la misma sección de pavimento, o dicho de otra manera, los Factores de Equivalencia transforman las repeticiones de un eje cualquiera, a un número de repeticiones del eje patrón que causan el mismo efecto daño sobre el pavimento que el daño causado por ese eje cualquiera”⁹.

$$\frac{W_x}{W_{18}} = \left[\frac{L_{18} + L_{2S}}{L_X + L_{2X}} \right]^{4.79} \left[\frac{10^{G/\beta_x}}{10^{G/\beta_{18}}} \right] [L_{2X}]^{4.33} \quad \text{Ecuación N° 5}^{10}$$

⁹Apuntes de Pavimentos, Volumen 1, Ing. Gustavo Corredor M., pág. 54.

¹⁰ http://pavementinteractive.org/index.php?title=Flexible_Pavement_ESAL_Equation

Donde:

W = Aplicación de carga inversa del Factor de Equivalencia

L_X = Carga por eje que se evalúa (kips)

L_{18} = 18 (Carga por eje estándar en kips)

L_2 = Código para configuración del eje

1= Eje simple

2= Eje tandem

3= Eje Tridem

x = Factor de equivalencia del eje siendo evaluado

s = Código para el eje estándar= 1 (Eje Simple)

Factor de Pérdida de Serviciabilidad

$$G = \log \left(\frac{4.2 - pt}{4.2 - 1.5} \right) \quad \text{Ecuación N° 6}^{11}$$

Relación logarítmica entre la pérdida de serviciabilidad en el tiempo, t , y la pérdida potencial de tomarse en un punto donde $pt = 1.5$.

pt = Índice Final de Serviciabilidad (punto en el que se considera el pavimento para estar al final de su vida útil).

Factor de Curva de la Serviciabilidad

$$\beta = \frac{0.4 + 0.081(L_X + L_{2X})^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_{2X}^{3.23}} \quad \text{Ecuación N° 7}^{12}$$

Función de diseño y variables de carga que tienen influencia en la forma de la curva de serviciabilidad.

SN= Número Estructural.

¹¹http://pavementinteractive.org/index.php?title=Flexible_Pavement_ESAL_Equation

¹² http://pavementinteractive.org/index.php?title=Flexible_Pavement_ESAL_Equation

Dado que cada tipo de pavimento responde de manera diferente a una carga, los FEC's cambian de acuerdo al tipo de pavimento, según el SN (pavimentos flexibles) o el espesor de losa (pavimentos rígidos), y el nivel de serviciabilidad adoptado. Es así que pavimentos rígidos y flexibles tienen diferentes FEC's.

5.5.7.1. Número Estructural (SN).

Es un número que expresa la resistencia estructural requerida de un pavimento ante las combinaciones del tráfico total expresado en repeticiones de 18 Kips ó 8,165 Kg. de ejes equivalentes de diseño (ESAL's), condiciones ambientales a las que va a estar sometido dicho pavimento durante su vida útil, índice de serviciabilidad inicial e índice de serviciabilidad final. Se determina por cada capa de la estructura de pavimento.

5.5.7.2. Índice de Serviciabilidad.

La Serviciabilidad de un pavimento se define como la capacidad de servir al tipo de tránsito para el cual ha sido diseñado. Así se tiene un índice de Serviciabilidad presente PSI (Present Serviciability Index) mediante el cual el pavimento es calificado entre 0 (pésimas condiciones) y 5 (perfecto).

Tabla 1. Índice de Serviciabilidad

PSI	CONDICIÓN
0-1	MUY POBRE
1-2	POBRE
2-3	REGULAR
3-4	BUENA
4-5	MUY BUENA

Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón. Libro de Diseño de Pavimentos AASTHO - 93 Capítulo II Pág. 19

En el diseño del pavimento se deben elegir la Serviciabilidad inicial y final. La inicial, P_o , es función del diseño del pavimento y de la calidad de la construcción. La final o terminal, P_t , es función de la categoría del camino y es adoptada en base a ésta y al criterio del proyectista.

Serviciabilidad inicial:

- $P_o = 4.5$ para pavimentos rígidos.
- $P_o = 4.2$ para pavimentos flexibles.

Serviciabilidad final:

- $P_t = 2.5$ o más para caminos muy importantes.
- $P_t = 2.0$ para caminos de menor tránsito.

La infraestructura vial en mal estado afecta a los vehículos que la transitan, ya que los costos de operación vehicular aumentan por el daño causado en ellos y por un mayor consumo de combustible, asimismo afecta las velocidades de circulación. También afecta el pavimento, por que modifica el estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura de la vía, lo que produce también incrementos en las actividades de conservación y rehabilitación.

Como se mencionó anteriormente la clasificación de las carreteras es muy importante para establecer el P_t , por lo que es necesario definir claramente los criterios que se usan en Nicaragua, para la clasificación funcional de las carreteras:

5.5.7.2.1. Clasificación Funcional de Carreteras.

La clasificación funcional de carreteras puede definirse como un sistema que basa su teoría en dos funciones de servicio básico: accesibilidad y movilidad. Las facilidades que suministran el mismo carácter o tipo de servicio son clasificadas dentro del mismo sistema funcional y luego todos los sistemas son combinados para formar una red integrada que refleja las características de servicio de las vías de comunicación.

En Nicaragua, la nominación de clasificación funcional que está siendo utilizada fue elaborada en 1975 por la firma consultora Wilbur Smith Asociados y Cisneros - Conrado. Los criterios que la sustentan tienen su base en las recomendaciones y normas de organización internacionales como los Congresos Panamericanos de

Carreteras, auspiciados por la OEA y del cual Nicaragua es miembro. En consecuencia técnicamente es la clasificación que mejor se adecua a las condiciones reales del sistema vial nacional.

La clasificación de las carreteras del país fue definida, mediante el acuerdo ministerial N° 93-2005 del 23 de Diciembre de 2005, en cinco tipos:

- Troncal Principal.
- Troncal Secundario.
- Colectora Principal.
- Colectora Secundaria.
- Caminos Vecinales.

5.5.8. Factor Camión (FC).

Se define como el número de ESAL's por vehículo. Expresa el daño en términos de deterioro producido por un vehículo en particular, es decir los daños producidos por cada eje de un vehículo son sumados para dar el daño producido por ese vehículo.

Se obtiene dividiendo el valor obtenido al sumar el total de cargas equivalentes de cada camión, de un número dado de camiones que circulan por una sección de carretera, entre el número total de camiones considerados en la sumatoria de los ejes equivalentes.

$$FC = \frac{N^{\circ} ESAL's}{N^{\circ} Camiones} \quad \text{Ecuación N}^{\circ} 8^{13}$$

5.5.9. Factor de Distribución por Dirección (FDD).

Es el factor del total del flujo vehicular censado, en la mayoría de los casos este valor es de 0.5; ya que la mitad de los vehículos va en una dirección y la otra mitad en la otra dirección.

¹³ Extraído de Diseños de Pavimentos AASHTO 93. Pág. 50

Puede darse el caso de ser mayor en una dirección que en la otra, lo cual puede deducirse del conteo de tránsito efectuado (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Factor de Distribución por Dirección (FDD)

Número de carriles en ambas direcciones	FDD (%)
2	50
4	45
6 ó más	40

Fuente: Secretaria de Integración Económica Centroamericana, SIECA.
Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002

5.5.10. Factor de Distribución por Carril (FDC).

Se define por el carril de diseño aquel que recibe el mayor número de ESAL's. Para un camino de dos carriles, cualquiera de los dos puede ser el carril de diseño, ya que el tránsito por dirección forzosamente se canaliza por ese carril. Para caminos de varios carriles, el de diseño será el externo, por el hecho de que los vehículos pesados van en ese carril, (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Factor de Distribución por Carril (FDC)

Número de carriles en una sola dirección	FDC
1	1
2	0.80-1
3	0.60-0.80
4	0.50-0.75

Fuente: Secretaria de Integración Económica Centroamericana, SIECA.
Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002

5.5.11. Factores que Afectan la Exactitud del Cálculo de los ESAL's¹⁴

1. **Valor Inicial de la Serviciabilidad.** Este parámetro tiene un impacto significativo en la elección de los FEC's para el cálculo de los ESAL's. Los FEC's aumentan a medida que la serviciabilidad inicial baja, por ello es importante procurar los más altos niveles de regularidad superficial en las carreteras, aspecto que incrementa su vida útil.
2. **Valor Final de la Serviciabilidad.** Este valor también influye en el valor del FEC. Esto resulta de la relación no lineal entre las cargas y el decremento de serviciabilidad. Por otro lado las fallas producen una disminución en la serviciabilidad relacionada de una manera logarítmica con el número de cargas.
3. **Resistencia Relativa del Pavimento.** Si bien los FEC's varían de acuerdo al tipo de pavimento, esta diferencia no es muy grande y no se justifica hacer un cálculo iterativo en el cual el número estructural o espesor de losa del pavimento deban converger al número estructural o espesor de losa usado para el cálculo de los ESAL's.
4. **Composición del Tránsito.** El flujo vehicular está compuesto por vehículos de distinto tipo y pesos. Los vehículos livianos tienen una incidencia muy pequeña en el cálculo de los ESAL's y pueden ser despreciados. Por el contrario, los vehículos pesados tienen una incidencia muy grande sobre los ESAL's y cualquier variación en la cantidad de los mismos puede arrojar diferencias significativas en el valor final.
5. **Peso y Porcentaje de Camiones.** Últimamente el número de camiones, se está elevando proporcionalmente con respecto al de los automóviles y sus respectivas cargas también. Todo esto trae como consecuencia un fuerte incremento en el número de ESAL's en los últimos años. Para obtener un buen resultado en el número de ESAL's es necesario clasificar los camiones en sus distintas categorías, pesos y tasas de crecimiento por categoría y estimar cuidadosamente el crecimiento futuro de los mismos.

¹⁴ Extraído de Diseño de Pavimento AASHTO '93, Abril 1995.

6. **Configuración de Ejes.** Un eje tándem de 160 KN no produce el mismo daño que dos ejes simples de 80 KN cada uno. En la medida en que aumenten las cargas se irán pensando nuevas configuraciones de ejes para mantener la carga por eje dentro de valores aceptables. Esta práctica, sin embargo, no va a garantizar una tasa similar de deterioro del pavimento. Para comparar distintas configuraciones de ejes, es necesario analizar su efecto sobre el pavimento, es decir tensiones y deformaciones inducidas, y no extrapolar valores de FEC's de las tablas de la AASHTO.
7. **Presión de Neumáticos.** Un incremento en las presiones de neumáticos produce un incremento de tensiones en el pavimento creando diferentes tipos de falla que los previstos para la confección de los FEC de la AASHTO, aunque los deterioros se limitan a las capas más superficiales.

La presión de inflado tiene gran importancia en el espesor de una estructura de pavimento, ya que a mayor presión de inflado y menor espesor de la capa de rodadura, incrementa en buena medida el número de ejes equivalentes y por lo tanto mayor daño a una estructura determinada.

La presión unitaria que se ejerce sobre los pavimentos o superficies de rodadura es función del área de contacto entre la llanta y estas superficies. De tal forma, que al aumentar el área de contacto entre la llanta y el pavimento por efecto de la reducción de la presión de inflado se disminuye la presión unitaria que el vehículo ejerce sobre el pavimento. Esto causa un menor deterioro en las carreteras.

VI. DISEÑO METODOLÓGICO.

6.1. Área de Estudio.

La región sobre la que se desarrolla el estudio corresponde al sector nor-occidental del país, en el Departamento de León, zona densamente poblada y de gran potencial económico y social, que se caracteriza por sus terrenos planos con pendientes suaves y tangentes largas, así como también terrenos ondulados con pendientes moderadas.

Se considerará como área de interés al tramo de carretera Empalme Malpaisillo–Empalme San Isidro, (72.06 Km.), de la Zona III (León - Matagalpa), esta carretera se identifica en la red vial nicaragüense con el código NIC – 26, y es una de las rutas mediante la cual se tiene acceso de la costa del Pacífico al Valle de Sébaco.

La ubicación geográfica del proyecto es la siguiente:

Latitud: Entre los 12°31' y los 12°54' en el Hemisferio Norte.

Longitud: Entre los 86°10' y los 86°52' en el Hemisferio Occidental.

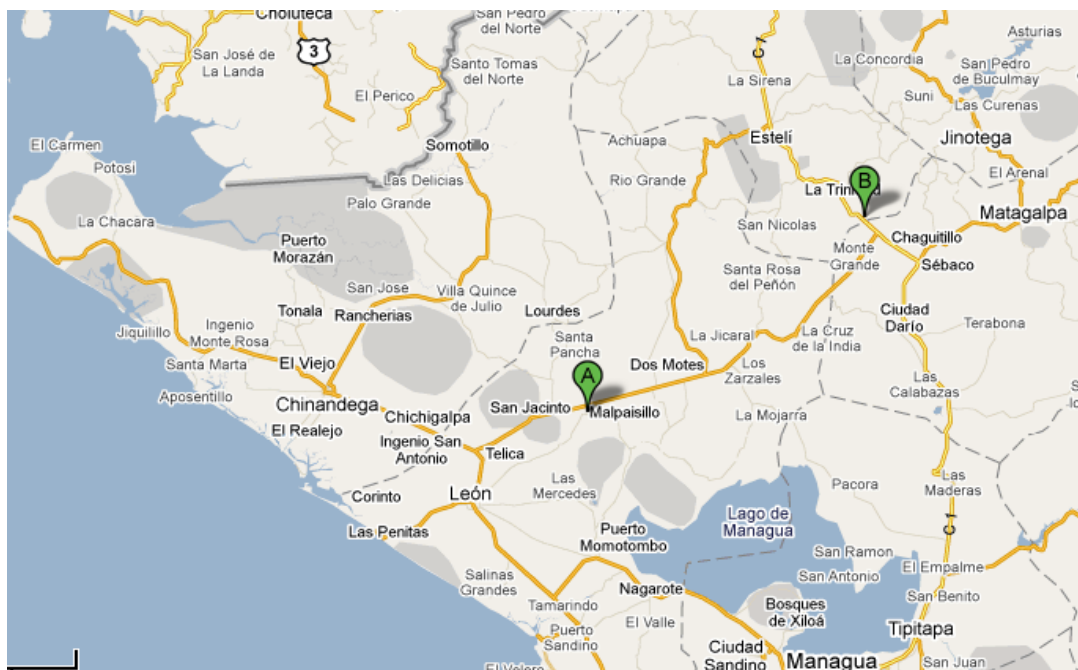


Figura 6. Área de Estudio. Fuente: google maps

A. Malpaisillo
B. San Isidro

6.2. Datos Extraídos del Diseño.

Para la Revisión del Procedimiento en el Cálculo de los ESAL's, se trabajará con los datos considerados por el diseñador en el informe final del estudio de ingeniería Rediseño de la Carretera Malpaisillo – San Isidro (Consortio Prointec & Edicro, S.A), del cual fueron extraídos el TPDA, Tasas de Crecimiento del Tráfico, FDD, FDC, Clasificación Vehicular, Período de Diseño, Factor Equivalente de Carga para la categoría de Vehículos Livianos. Calcularemos los Factores Equivalentes de Carga (FEC's) para la categoría de vehículos medianos y pesados, haciendo uso del Diagrama de Cargas Permisibles considerado por el diseñador. Con estos datos estimaremos nuevamente los Ejes Equivalentes de Carga para el tramo en estudio, y de esta manera determinar si a través del Procedimiento realizado por el Diseñador se están reflejando las cargas que circulan por la vía en estudio.

6.3. Población y Muestra.

La población en este estudio está constituida por los vehículos de transporte de carga y vehículos de pasajeros que circulan en el tramo de carretera Empalme Malpaisillo – Empalme San Isidro.

Utilizaremos información de los Reportes Diarios de la Estación de Pesaje Móvil N°2 ubicada en Malpaisillo, para calcular los FEC's de los vehículos de Carga con los datos de peso por ejes registrados. De estos reportes se extrae una muestra de 1,200 registros (detallados en la Tabla 4), en el periodo comprendido Octubre 2009 - Marzo 2010; ya que solamente de este periodo se encuentran datos de pesajes en dicha báscula.

También se obtuvo una muestra de 50 registros de vehículos de pasajeros y vehículos de carga livianos (detallados en la Tabla 5), con esos datos se calcularon sus respectivos FEC's y así se determinó el daño que causan a la estructura de Pavimento. Los ESAL's obtenidos con estos datos siguiendo el Procedimiento Simplificado se compararan con los ESAL's determinados por el Diseñador, y se obtendrán las respectivas conclusiones y recomendaciones.

Tabla 4. Tránsito de Vehículos de Carga.

Año	Mes	Tipo de Vehículo									Total
		C2	C3	C4	T2-S1	T2-S2	T2-S3	T3-S1	T3-S2	T3-S3	
2009	Octubre	23	24						85		132
	Noviembre	33	20						98		151
	Diciembre	9	5						37		51
2010	Enero	62	35						166		263
	Febrero	107	42						203		352
	Marzo	52	29						170		251
Total		286	155						759		1200

Tabla 5. Tránsito de Vehículos de Pasajeros y Vehículos de Carga Livianos.

Tipo de Vehículo			Total
Camionetas	Buses	C2 Livianos	
13	19	18	50

VII. REVISIÓN DEL PROCEDIMIENTO EN EL CÁLCULO DE LOS EJES EQUIVALENTES DE CARGA (ESAL's).

El presente estudio está enfocado principalmente en revisar el procedimiento en el cálculo de ejes equivalentes para determinar si a través del procedimiento utilizado por el diseñador se están reflejando adecuadamente las cargas que circulan en la vía, ya que si la estimación de la carga que circulara sobre la estructura vial no se hace de manera correcta esto influirá de manera negativa en el comportamiento de la misma, y de esta forma establecer si es necesario efectuar estudios de pesos por ejes que conlleven a una reducción de costos de mantenimiento. Siendo esto de vital importancia para diseñar una estructura de pavimento flexible que brinde un mejor confort, seguridad y mejor capacidad estructural ante las solicitaciones de cargas impuestas.

7.1. Método Empleado en el Cálculo de Ejes Simples Equivalentes de Carga.

El Método empleado para la revisión, corresponde a la versión de 1993 del procedimiento desarrollado por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) para el Diseño de Estructuras de Pavimento. Esta versión es la utilizada por el Diseñador para determinar los Ejes Equivalentes en el Informe Final Rediseño de la Carretera Malpaisillo – San Isidro (Consortio Prointec & Edicro, S.A).

7.2. Determinación de Ejes Simples Equivalentes de Carga.

Considerando que los ejes equivalentes de carga son el número de repeticiones de carga equivalentes a 8.2 toneladas, 18 kips ó 18,000 libras, en el carril de diseño durante la vida útil del pavimento, el análisis de las cargas a ser impuestas por el tráfico se basará en la información descrita en el Informe de Tráfico suministrado por el MTI y en función de las consideraciones que a continuación se indican:

7.2.1. Determinación de las Variables a Utilizar.

7.2.2. Tráfico.

La variable Tráfico se determinó partiendo de los datos del Tránsito Promedio Diario Anual Totales (TPDA), obtenido de los resultados del Informe Final Rediseño de la Carretera Malpaisillo – San Isidro (Consortio Prointec & Edicro, S.A), suministrado por el MTI. Para la determinación de los valores de los ESAL's, no se tomaron en cuenta motocicletas, entonces se procede a:

1. Cálculo de ejes equivalentes con las máximas cargas permisibles autorizadas en Nicaragua por tipo de vehículo.

2. Se aplicará un porcentaje promedio de ocupación del vehículo, según los resultados del estudio de tráfico (se considera un porcentaje promedio de ocupación del 100%).

7.2.3. Tasa de Crecimiento.

Las tasas de crecimiento vehicular utilizadas por el diseñador corresponden a:

Tabla 6. Tasa de Crecimiento para Vehículos de Pasajeros.

Tasas de Crecimiento para Vehículos de Pasajeros	
Periodo (Año)	Tasa (%)
2009 – 2015	3.10
2015 – 2024	3.10

La tasa de crecimiento para vehículos de pasajeros incluye la categoría de vehículos livianos y vehículos pesados de pasajeros.

Tabla 7. Tasa de Crecimiento para Vehículos de Carga.

Tasas de Crecimiento para Vehículos de Carga	
Periodo (Año)	Tasa (%)
2009 – 2015	3.50
2015 – 2024	4.50

7.2.4. Factor de Crecimiento.

Una vez determinadas las tasas de crecimiento para cada tipo de vehículo y establecido el periodo de diseño, se procede a la determinación de los factores de crecimiento para cada tipo de vehículo, haciendo uso de la Tabla C. Factores de Crecimiento de Tránsito (Ver Anexos, pág. 74), e interpolando entre estos, obtenemos los siguientes valores:

Tabla 8. Factores de Crecimiento para Vehículos Livianos y Pesado de Pasajeros.

Vehículos	Factor de Crecimiento
Livianos	18.79
Pesado Pasajeros	18.79

Tabla 9. Factor de Crecimiento para Vehículos Pesados de Carga.

Periodo	Vehículos	Factor de Crecimiento
2009-2015	Pesado	6.55
2015-2024	Pesado	10.81

7.2.5. Factores Equivalentes de Carga.

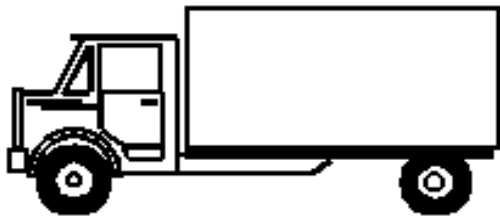
Para determinar los ESAL's es necesario calcular los FEC's, los cuales dependen según la Guía AASTHO 93, de:

1. **El Peso en el Eje y la Configuración del mismo:** Como se mencionó anteriormente el diseñador consideró que los vehículos circularan con las máximas cargas permisibles autorizadas en Nicaragua y según el estudio de tráfico el porcentaje de ocupación de estos es del 100 por ciento.
2. **El Tipo de Pavimento:** El estudio se encauza en revisar el procedimiento en el cálculo de Ejes Equivalentes de Carga en el Diseño de Pavimento Flexible en el Tramo de Carretera Empalme Malpaisillo – Empalme San Isidro. Por lo que el pavimento a estudiar es Pavimento Flexible.
3. **El numero estructural SN:** Se empleó un SN de 5, el cual es considerado por el diseñador en el Informe Final Rediseño de la Carretera Malpaisillo – San Isidro (Consortio Prointec & Edicro, S.A)
4. **Los Niveles de Serviciabilidad Inicial y Final adoptados por el Diseñador:**
Serviciabilidad inicial del pavimento $(P_o) = 4.2$ para Pavimento Flexible.
Serviciabilidad final del pavimento $(P_t) = 2.0$ para Caminos de menor Tránsito, como Colectoras Principales y Secundarias.

A continuación se presenta detalladamente el cálculo de los Factores Equivalentes de Carga, se consideró un $SN = 5$ y un $P_t = 2.0$. Y se utilizaron las tablas de Factores Equivalentes de Carga¹⁵. Estos factores se determinan en función de los pesos de cada tipo de vehículo, se han considerado las máximas cargas permisibles de nuestro país de acuerdo al Diagrama Permisibles de Cargas utilizado por el Diseñador (Ver Anexo Tabla A, pág. 72).

¹⁵ AASHTO Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento, 1993. Tablas D-1 a D-3.

Vehículo de Carga C-2



4.5 T
9.9189 kips

Eje Simple # 1

9 T
19.8378 kips

Eje Simple # 2

Cálculo del FEC para el Eje Sencillo # 1

Seleccionar:

El peso en Kips del eje en estudio: 9.9189 kips.

El valor del SN: 5

El valor del Pt: 2.0

Ver (Anexo Tabla D, Pág. 75) Factores Equivalentes de Carga para Pavimentos Flexibles, Ejes Simples, Pt: 2.0, e interpolar:

Fórmula para la Interpolación:

A – D

B – X

C – E

$$\frac{(A - B)}{(A - C)} = \frac{(D - X)}{(D - E)}$$

Despejando X se tiene:

$$X = D - \left(\frac{(A - B)(D - E)}{(A - C)} \right)$$

Carga p/ Eje Kips	FEC
8	0.031
10	0.079

$$X = 0.031 - \left(\frac{(8 - 9.9189)(0.031 - 0.079)}{(8 - 10)} \right)$$

$$X = 0.0771$$

El FEC para el Eje Sencillo # 1 es de 0.0771.

Usando la Ecuación N°5, Ecuación N°6 y Ecuación N°7 tenemos:

$$\frac{W_x}{W_{18}} = \left[\frac{L_{18} + L_{2S}}{L_X + L_{2X}} \right]^{4.79} \left[\frac{10^{G/\beta_x}}{10^{G/\beta_{18}}} \right] [L_{2X}]^{4.33}$$

$$W_{18} = 18,000 \text{ lbs (80kN o 18 kips)}$$

$$L_X = L_{9.9189} = 9.9189 \text{ kips}$$

$$L_{18} = 18 \text{ (Carga por eje estándar en kips)}$$

$$L_2 = 1 \text{ Eje simple}$$

s= Código para el eje estándar= 1 (Eje Simple)

$$G = \log \left(\frac{4.2 - 2.0}{4.2 - 1.5} \right)$$

$$G = -0.08894$$

$$\beta = 0.4 + \frac{0.081(9.9189 + 1)^{3.23}}{(5 + 1)^{5.191^{3.23}}}$$

$$\beta = 0.4167$$

$$G/\beta_{9.9189} = -0.2134$$

$$\beta = 0.4 + \frac{0.081(18 + 1)^{3.23}}{(5 + 1)^{5.191^{3.23}}}$$

$$\beta = 0.50$$

$$G/\beta_{18} = -0.1779$$

$$\frac{W_x}{W_{18}} = \left[\frac{18 + 1}{9.9189 + 1} \right]^{4.79} \left[\frac{10^{-0.2134}}{10^{-0.1779}} \right] [1]^{4.33}$$

$$\frac{W_x}{W_{18}} = 13.0874$$

$$LEF = \frac{1}{13.0874}$$

$LEF = 0.076$ El resultado obtenido utilizando las tablas de los FEC's y el resultado obtenido con las ecuaciones no difieren en gran manera, por lo que para los siguientes cálculos se utilizarán las tablas de los Factores Equivalentes de Carga presentadas en el manual de la SIECA.

Cálculo del FEC para el Eje Sencillo # 2

Seleccionar:

El peso en Kips del eje en estudio: 19.8378 kips.

El valor del SN: 5

El valor del Pt: 2.0

Ver (Anexo Tabla D, Pág. 75) Factores Equivalentes de Carga para Pavimentos Flexibles, Ejes Simples, Pt: 2.0, e interpolar:

Fórmula para la Interpolación:

A – D

B – X

C – E

$$\frac{(A - B)}{(A - C)} = \frac{(D - X)}{(D - E)}$$

Despejando X se tiene:

$$X = D - \left(\frac{(A - B)(D - E)}{(A - C)} \right)$$

Carga p/ Eje Kips	FEC
18	1.00
20	1.57

$$X = 1.00 - \left(\frac{(18 - 19.8378)(1.00 - 1.57)}{(18 - 20)} \right)$$

$$X = 1.5238$$

El FEC para el Eje Sencillo # 2 es de 1.5238.

Para obtener el valor del FEC del vehículo en estudio (C - 2) simplemente se suman los dos factores anteriormente encontrados, como se muestra a continuación:

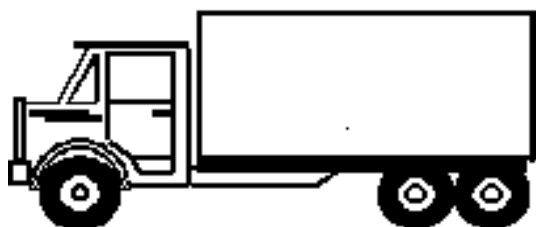
$$FEC_{C-2} = (FEC_{Eje\ Sencillo\ 1}) + (FEC_{Eje\ Sencillo\ 2})$$

$$FEC_{C-2} = 0.0771 + 1.5238$$

$$FEC_{C-2} = 1.601$$

Es decir que el paso de este camión causa el mismo daño sobre el pavimento que el causaría un “camión virtual de 1.601 ejes simples de cuatro ruedas, cada eje cargado con 8,2 toneladas”.

Vehículo de Carga C-3



5 T
11.021 kips
Eje Simple # 1

16 T
35.2672 kips
Eje Tándem # 1

Cálculo del FEC para el Eje Sencillo # 1

Para estimar el valor del FEC para este eje, se sigue el mismo procedimiento detallado anteriormente en el cálculo del FEC para el eje sencillo # 1 del vehículo de carga C-2. Dando como resultado:

El FEC para el Eje Sencillo # 1 es de 0.1275.

Cálculo del FEC para el Eje Tándem # 1

Para estimar el valor del FEC para este eje, se sigue el mismo procedimiento detallado anteriormente en el cálculo del FEC para el eje sencillo con la diferencia que los valores utilizados para interpolar y encontrar el valor correspondiente para este tipo de eje son extraídos de la Tabla E. Factores Equivalentes de Carga para Pavimentos Flexibles, Ejes Tándem, Pt: 2.0 (Ver Anexo, pág. 76). Dando como resultado:

El FEC para el Eje Tándem # 1 es de 1.2701.

Usando la Ecuación N°5, Ecuación N°6 y Ecuación N°7 tenemos:

$$\frac{W_x}{W_{18}} = \left[\frac{L_{18} + L_{2S}}{L_X + L_{2X}} \right]^{4.79} \left[\frac{10^{G/\beta_x}}{10^{G/\beta_{18}}} \right] [L_{2X}]^{4.33}$$

$$W_{18} = 18,000 \text{ lbs (80kN o 18 kips)}$$

$$L_{35.2672} = 35.2672 \text{ kips}$$

$$L_{18} = 18 \text{ (Carga por eje estándar en kips)}$$

$$L_{2X} = 2 \text{ (Eje Tándem)}$$

$$L_{2S} = 1 \text{ (Eje Simple)}$$

$$G = \log \left(\frac{4.2 - 2.0}{4.2 - 1.5} \right)$$

$$G = -0.08894$$

$$\beta = 0.4 + \frac{0.081(35.2672 + 2)^{3.23}}{(5 + 1)^{5.19} 2^{3.23}}$$

$$\beta = 0.4940$$

$$G/\beta_{35.2672} = -0.18004$$

$$\beta = 0.4 + \frac{0.081(18 + 1)^{3.23}}{(5 + 1)^{5.19} 1^{3.23}}$$

$$\beta = 0.50$$

$$G/\beta_{18} = -0.1779$$

$$\frac{W_x}{W_{18}} = \left[\frac{18 + 1}{35.2672 + 2} \right]^{4.79} \left[\frac{10^{-0.18004}}{10^{-0.1779}} \right] [2]^{4.33}$$

$$\frac{W_x}{W_{18}} = 0.7941$$

$$LEF = \frac{1}{0.7941}$$

$$LEF = 1.26$$

Para obtener el valor del FEC del vehículo en estudio (C - 3) simplemente se suman los dos factores anteriormente encontrados, como se muestra a continuación:

$$FEC_{C-3} = (FEC_{Eje\ Sencillo\ 1}) + (FEC_{Eje\ Tandem\ 1})$$

$$FEC_{C-3} = 0.1275 + 1.2701$$

$$FEC_{C-3} = 1.397$$

Es decir que el paso de este camión causa el mismo daño sobre el pavimento que el causaría un “camión virtual de 1.397 ejes simples de cuatro ruedas, cada eje cargado con 8,2 toneladas”.

Vehículo de Carga T3 – S2



5 T	16 T	16 T
11.021 kips	35.2672 kips	35.2672 kips
Eje Simple # 1	Eje Tandem # 1	Eje Tandem # 2

Cálculo del FEC para el Eje Sencillo # 1

Para obtener el valor del FEC para este eje, se sigue el mismo procedimiento detallado anteriormente en el cálculo del FEC para el eje sencillo. Dando como resultado:

El FEC para el Eje Sencillo # 1 es de 0.1275.

Cálculo del FEC para el Eje Tandem # 1 y Eje Tandem # 2.

Para estimar el valor del FEC para estos eje, se sigue el mismo procedimiento detallado anteriormente en el cálculo del FEC para los ejes sencillos con la diferencia que los valores utilizados para interpolar y encontrar el valor correspondiente para este tipo de eje son extraídos de la Tabla E. Factores Equivalentes de Carga para Pavimentos Flexibles, Ejes Tandem, Pt: 2.0 (Ver Anexo, pág. 76). Dando como resultado:

El FEC para el Eje Tandem # 1 es de 1.2701.

El FEC para el Eje Tandem # 2 es de 1.2701.

Para obtener el valor del FEC del vehículo en estudio (T3 – S2) simplemente se suman los tres factores anteriormente encontrados, como se muestra a continuación:

$$FEC_{T3-S2} = (FEC_{Eje\ Sencillo\ 1}) + (FEC_{Eje\ Tandem\ 1}) + (FEC_{Eje\ Tandem\ 2})$$

$$FEC_{T3-S2} = 0.1275 + 1.2701 + 1.2701$$

$$FEC_{T3-S2} = 2.667$$

Es decir que el paso de este camión causa el mismo daño sobre el pavimento que el causaría un “camión virtual de 2.667 ejes simples de cuatro ruedas, cada eje cargado con 8,2 toneladas”.

A continuación se presentan los valores de los FEC's para los vehículos livianos, pesado de pasajeros y pesados de carga.

Tabla 10. Factores Equivalentes de Vehículos Livianos, Pesado de Pasajeros y Pesados de Carga.

Vehículos	FEC's
Livianos	0.0004
Pesado Pasajeros	
Micro bus	0.0004
Bus	0.2650
Pesados	
C2 Liviano	0.178
C2	1.601
C3	1.397
T3-S2	2.667

7.2.6. Factor de Sentido.

El número de carriles de esta vía son dos, uno por cada sentido, por lo que se estará usando un LD de **0.5**, esto es muy razonable, dado que del 100% de vehículos que estará utilizando la vía en ambos sentidos, se distribuirán de tal manera que un 50% lo hará un sentido de ida de acuerdo a su destino y el otro 50% viceversa.

7.2.7. Factor de Carril.

El factor de carril recomendado está en función del número de carriles por sentido, por lo tanto el FC utilizado será de **1.00**; puesto que será un único carril que reciba la acción de los ejes equivalentes. De esta manera cada uno de los carriles por sentido será capaz de soportar el 100% de ejes equivalentes.

7.2.8. Período de Diseño.

El período de diseño recomendado para esta vía es de **15 años**, puesto que está clasificada como una *Troncal Secundaria*; es muy importante hacer la aclaración entre lo que se denomina *vida útil* de *período de diseño*.

El **período de diseño**, es el tiempo para el cual se está proyectando que el pavimento reciba la acción de tráfico determinado para este período, al finalizar este período, puede que se necesite realizar una intervención a nivel de rehabilitación, refuerzo u otra intervención para recuperar el nivel de servicio y capacidad estructural de acuerdo al tráfico presente. El período de diseño, está comprendido entre el año 2005 y 2020, sin embargo para la determinación de los ejes equivalentes se procedió a determinar los ejes de cada uno de los años del periodo de diseño. **Vida útil**, es el tiempo en el cual el pavimento alcanza el índice de serviciabilidad final, medido a partir de finalizada su construcción.

7.2.9. Ejes Equivalentes Propuestos por el Diseñador.

El resultado de los ESAL's presentado por Diseñador es:

Tabla 11. Ejes Equivalentes determinados por el Diseñador.

n (años)	TPDA inicial	N° Carriles	ESAL's
15	779	2	1,387,334.89

El resultado de los ESAL's obtenido al realizar la Revisión en el Procedimiento empleado por el Diseñador, y el cual corresponde al Método AASHTO 1993, es:

Tabla 12. Resultado de Ejes Equivalentes de Carga para cada año del Periodo de Diseño.

Categoría	Vehículo Liviano			Pesado de Pasajeros		Pesado de Carga				ESAL's	Tasa después del 2015
Tipo	Autos	Jeep	Pick Up	M Bus	Bus	C2 Liv	C2	C3	T3S2		
Tasa	3.1%	3.1%	3.1%	3.1%	3.1%	3.5%	3.5%	3.5%	3.5%		4.5%
FEC	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.265	0.178174	1.6015	1.3979	2.667		Ejes Acumulados
Año	FDD	1	FC	0.5	Periodo de Diseño		15	Días del año	365		
2009	50	67	283	25	108	81	86	16	63	67,769.28	67,769.28
2010	51.55	69.08	291.77	25.78	111.35	83.84	89.01	16.56	65.21	70,120.18	137,889.46
2011	53.15	71.22	300.82	26.57	114.80	86.77	92.13	17.14	67.49	72,552.72	210,442.18
2012	54.80	73.43	310.14	27.40	118.36	89.81	95.35	17.74	69.85	75,069.73	285,511.91
2013	56.49	75.70	319.76	28.25	122.03	92.95	98.69	18.36	72.29	77,674.13	363,186.04
2014	58.25	78.05	329.67	29.12	125.81	96.20	102.14	19.00	74.82	80,368.98	443,555.02
2015	60.05	80.47	339.89	30.03	129.71	105.48	111.99	20.84	82.04	87,721.32	531,276.34
2016	61.91	82.96	350.43	30.96	133.73	110.23	117.03	21.77	85.73	91,580.43	622,856.77
2017	63.83	85.54	361.29	31.92	137.88	115.19	122.30	22.75	89.59	95,610.47	718,467.24
2018	65.81	88.19	372.49	32.91	142.15	120.37	127.80	23.78	93.62	99,819.03	818,286.27
2019	67.85	90.92	384.04	33.93	146.56	125.79	133.56	24.85	97.84	104,214.07	922,500.33
2020	69.95	93.74	395.94	34.98	151.10	131.45	139.57	25.97	102.24	108,803.88	1031,304.21
2021	72.12	96.64	408.22	36.06	155.79	137.37	145.85	27.13	106.84	113,597.14	1144,901.35
2022	74.36	99.64	420.87	37.18	160.62	143.55	152.41	28.36	111.65	118,602.90	1263,504.25
2023	76.66	102.73	433.92	38.33	165.59	150.01	159.27	29.63	116.67	123,830.64	1,387,334.89
2024									Total	1,387,334.89	

7.3. Cálculo de los Ejes Equivalentes de Carga para el Tramo de Carretera Empalme Malpaisillo- Empalme San Isidro con los datos de la Estación Pesadora y Tasas de Crecimiento de Tráfico estimada con los datos del registro histórico vehicular de la carretera en estudio proporcionado por el MTI.

Ahora calcularemos los nuevos ESAL's considerando:

- FDD, FDC, Clasificación Vehicular, Período de Diseño, considerados por el Diseñador.
- TPDA para el año 2009 en el tramo de carretera Empalme Malpaisillo - Empalme San Isidro, proporcionado por el MTI. (Ver Tabla 13, pág. 51)
- Tasas de Crecimiento de Tráfico estimada con los datos del registro histórico vehicular de la carretera en estudio proporcionado por el MTI.
- La información de los Reportes Diarios de la Estación de Pesaje Móvil N°2 (Ver Tabla 15, pág. 53) ubicada en Malpaisillo. Para calcular los FEC's de los vehículos de carga.
- Los datos de pesos por ejes de los vehículos de pasajeros y vehículos livianos (Ver Tabla 16, pág. 54) registrados en la báscula de Malpaisillo para calcular los FEC's de los vehículos de pasajeros y de los vehículos livianos.
- También calcularemos los ESAL's con los datos de FEC's utilizados y proporcionados por el MTI para vehículos livianos, vehículos pesados de pasajeros y vehículos pesado de carga.

7.3.1. Tráfico.

Tabla 13. Tránsito Promedio Diario para el año 2009.

COD NIC	Estación	Autos	Jeep	Cmta.	M Bus	Bus	C2 Liv	C2	C3	T3-S2	TPDA
Nic-26	2603	80	69	315	21	94	93	81	13	55	821

7.3.1.1. Tasas de Crecimiento.

Para estimar las tasas de crecimiento para los vehículos livianos y vehículos pesados se consideraron los últimos 4 años de registro de la serie histórica del tráfico del tramo de carretera Empalme Malpaisillo – Empalme San Isidro. Extrayendo de la Tabla G. Conteo Vehicular: Tramo Empalme Malpaisillo – San Isidro. (Ver Anexo, pág. 78) los datos de TPDA de los años 2005 y 2009.

Tabla 14. TPDA para Vehículos Livianos y Vehículos Pesados, años 2005 y 2009.

Año	Vehículos Livianos	Vehículos Pesados
2009	579	242
2005	470	213

Tasa de Crecimiento para Vehículos Livianos:

De la tabla anterior, tomamos como:

TPDA_i: 579. TPDA para el año 2009.

TPDA₀: 470. TPDA para el año 2005.

n: 4 años.

Introduciendo estos datos en la Ecuación N° 1

$$TC = \left[\left(\frac{TPDA_i}{TPDA_0} \right)^{1/n} \right] - 1$$

$$TC = \left[\left(\frac{579}{470} \right)^{1/4} \right] - 1$$

$$TC_{Veh. Liv.} = 5.35\%$$

Tasa de Crecimiento para Vehículos Pesados:

Realizando el mismo procedimiento para calcular la tasa de crecimiento para los vehículos pesados, obtenemos:

$$TC = \left[\left(\frac{242}{213} \right)^{1/4} \right] - 1$$

$$TC_{Veh. Pes.} = 3.24\%$$

Consideramos que la tasas crecimientos vehiculares que utilizamos para proyectar nuestros ESAL's son adecuadas, porque son obtenidas a través de conteos vehiculares realizados anualmente que muestran el comportamiento histórico del tráfico en la carretera. Y además, porque para proyectar el tránsito se pueden utilizar variables socioeconómicas del país sino se cuenta con conteos vehiculares realizados en el tramo en estudio.

Factores Equivalentes de Carga.

Para determinar los FEC's, se considera:

El Peso en el Eje y la Configuración del mismo: De los reportes diarios de la estación pesadora (Báscula ubicada en Malpaisillo), se toman los datos de peso en cada eje de cada tipo de vehículo. Estos datos nos permiten conocer valores reales de los pesos en cada eje del vehículo.

Tabla 15. Peso Promedio por Eje de vehículos de pasajeros y vehículo de carga liviano.

Tipo de Vehículo	Tipo de Eje del Tractor				Toneladas
	Eje Simple Direccional	Eje de Tracción			
		Eje Simple	Doble Rueda	Triple Rueda	
Camioneta	1.0231	1.3539			2.377
Bus	5.3632	7.9790			13.3422
C2 Liv	2.5111	3.4556			5.9667

Tabla 16. Peso Promedio por Eje de vehículos de carga.

Tipo de Vehículo	Tipo de Eje del Tractor				Tipo de Eje del Semirremolque			Toneladas
	Eje Simple Direccional	Eje de Tracción			Eje de Arrastre			
		Eje Simple	Doble Rueda	Triple Rueda	Eje Simple	Doble Rueda	Triple Rueda	
C-2	4.3587	8.4664						12.8251
C-3	4.5832		14.4374					19.0206
T3-S2	4.5174		14.6271			14.3043		33.4488

El Tipo de Pavimento: Pavimento Flexible.

El numero estructural SN: Utilizamos el valor SN=5, este valor fue determinado por el diseñador a través de una serie de iteraciones, y asumimos que este valor de SN se considera adecuado a las solicitudes del tráfico que tendrá que soportar la vía. Y también porque en la práctica, se han introducido algunas simplificaciones que no representan alteraciones significativas en la determinación final de los espesores. Así, se ha establecido que: “si se calculan los Factores Equivalentes de Carga de los pavimentos flexibles y rígidos, para un Número Estructural igual a 5 y un espesor de losas de hormigón de 9”, respectivamente, los resultados no son demasiado diferentes de los valores calculados para otras situaciones, de manera que es perfectamente aceptable utilizarlos para pavimentos”¹⁶.

Los Niveles de Serviciabilidad Inicial y Final adoptados por el Diseñador:

Serviciabilidad inicial del pavimento (Po)= 4.2 para Pavimento Flexible.

Serviciabilidad final del pavimento (Pt) = 2.0 para Caminos de menor Tránsito, como Colectoras Principales y Secundarias.

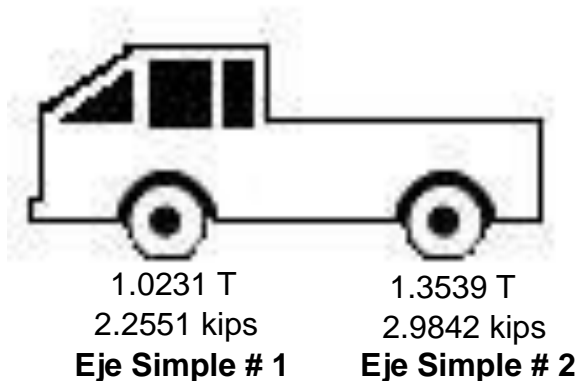
A continuación se presenta detalladamente el cálculo de los Factores Equivalentes de Carga, se consideró un SN= 5 y un Pt= 2.0. Y se utilizaron las tablas

¹⁶ Ing. Gustavo Corredor. Apuntes de Pavimentos Volumen 3, Método de Diseño. Pág. 45.

de Factores Equivalentes de Carga para determinar el FEC de cada uno de los ejes que conforman los vehículos en estudio.

Vehículo de Pasajeros

Camioneta



Cálculo del FEC para el Eje Sencillo # 1 y Eje Sencillo # 2.

Para obtener el valor del FEC para estos ejes, se sigue el mismo procedimiento detallado anteriormente en el cálculo del FEC para el eje sencillo. Dando como resultado:

El FEC para el Eje Sencillo # 1 es de 0.0004.

El FEC para el Eje Sencillo # 2 es de 0.0012.

Para obtener el valor del FEC del vehículo en estudio (Camioneta) simplemente se suman los dos factores anteriormente encontrados, como se muestra a continuación:

$$FEC_{Camioneta} = (FEC_{Eje\ Sencillo\ 1}) + (FEC_{Eje\ Sencillo\ 2})$$

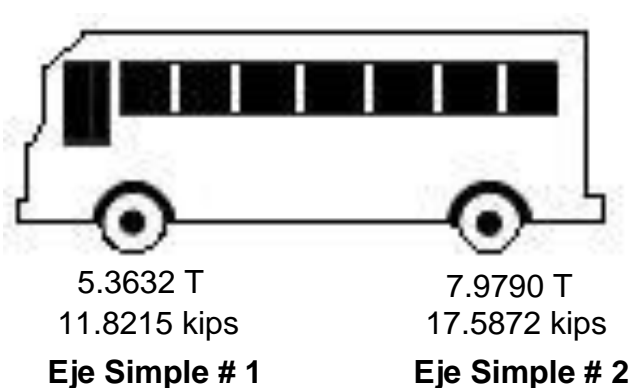
$$FEC_{Camioneta} = 0.0004 + 0.0012$$

$$FEC_{Camioneta} = 0.0016$$

Es decir que el paso de esta camioneta causa el mismo daño sobre el pavimento que el causaría un “camión virtual de 0.0016 ejes simples de cuatro ruedas, cada eje cargado con 8,2 toneladas”.

Se nota que el daño causado por la camioneta es mínimo, esto debido por la capacidad que tiene para transportar carga, pero se realizó el pesaje de ésta para ver su incidencia en el deterioro de la vía en estudio.

Bus



Cálculo del FEC para el Eje Sencillo # 1 y Eje Sencillo # 2.

Para obtener el valor del FEC para estos ejes, se sigue el mismo procedimiento detallado anteriormente en el cálculo del FEC para el eje sencillo. Dando como resultado:

El FEC para el Eje Sencillo # 1 es de 0.1655.

El FEC para el Eje Sencillo # 2 es de 0.9181.

Para obtener el valor del FEC del vehículo en estudio (Bus) simplemente se suman los dos factores anteriormente encontrados, como se muestra a continuación:

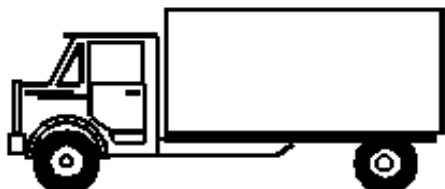
$$FEC_{Bus} = (FEC_{Eje\ Sencillo\ 1}) + (FEC_{Eje\ Sencillo\ 2})$$

$$FEC_{Bus} = 0.1655 + 0.9181$$

$$FEC_{Bus} = 1.0836$$

Es decir que el paso de esta camioneta causa el mismo daño sobre el pavimento que el causaría un “camión virtual de 1.0836 ejes simples de cuatro ruedas, cada eje cargado con 8,2 toneladas”.

Vehículo de Carga C2- Liviano



2.5111 T	3.4556 T
5.5350 kips	7.6167 kips
Eje Simple # 1	Eje Simple # 2

Cálculo del FEC para el Eje Sencillo # 1 y Eje Sencillo # 2.

Para estimar el valor del FEC para estos ejes, se sigue el mismo procedimiento detallado anteriormente en el cálculo del FEC para el eje sencillo. Dando como

El FEC para el Eje Sencillo # 1 es de 0.0073.

El FEC para el Eje Sencillo # 2 es de 0.0268.

Para obtener el valor del FEC del vehículo en estudio (C2 Liviano) simplemente se suman los dos factores anteriormente encontrados, como se muestra a continuación:

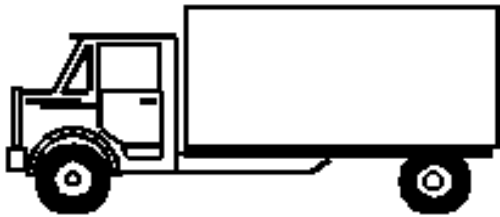
$$FEC_{C2-Liv} = (FEC_{Eje\ Sencillo\ 1}) + (FEC_{Eje\ Sencillo\ 2})$$

$$FEC_{C2-Liv} = 0.0073 + 0.0268$$

$$FEC_{C2-Liv} = 0.0341$$

Es decir que el paso de esta camioneta causa el mismo daño sobre el pavimento que el causaría un “camión virtual de 0.0341 ejes simples de cuatro ruedas, cada eje cargado con 8,2 toneladas”.

Vehículo de Carga C-2



4.3587 T	8.4664T
9.6075 kips	18.6617 kips
Eje Simple # 1	Eje Simple # 2

Para estimar el valor del FEC para este vehículo, se sigue el mismo procedimiento que se utilizó para calcular el FEC del vehículo de carga C-2 en la revisión del procedimiento utilizado por el diseñador (Ver pág. 40). Dando como resultado:

El FEC para el Eje Sencillo # 1 es de 0.0696.

El FEC para el Eje Sencillo # 2 es de 1.1886.

Para obtener el valor del FEC del vehículo en estudio (C - 2) simplemente se suman los dos factores anteriormente encontrados, como se muestra a continuación:

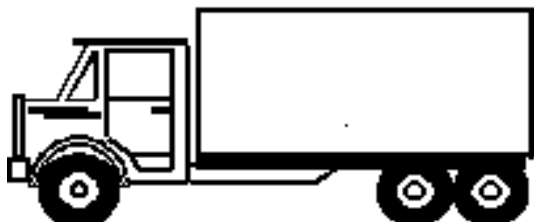
$$FEC_{C-2} = (FEC_{Eje\ Sencillo\ 1}) + (FEC_{Eje\ Sencillo\ 2})$$

$$FEC_{C-2} = 0.0696 + 1.1886$$

$$FEC_{C-2} = 1.2582$$

Es decir que el paso de esta camioneta causa el mismo daño sobre el pavimento que el causaría un “camión virtual de 1.2582 ejes simples de cuatro ruedas, cada eje cargado con 8,2 toneladas”.

Vehículo de Carga C- 3



4.5832 T
10.1023 kips

Eje Simple # 1

14.4374T
31.8230 kips

Eje Tandem # 1

Para estimar el valor del FEC para este vehículo, se sigue el mismo procedimiento que se utilizó para calcular el FEC del vehículo de carga C-3 en la revisión del procedimiento utilizado por el diseñador (Ver pág. 43). Dando como resultado:

El FEC para el Eje Sencillo # 1 es de 0.0839.

El FEC para el Eje Tandem # 1 es de 0.8111.

Para obtener el valor del FEC del vehículo en estudio (C - 3) simplemente se suman los dos factores anteriormente encontrados, como se muestra a continuación:

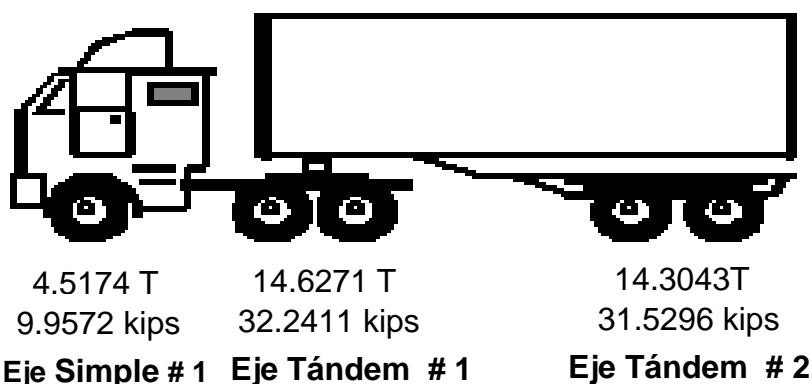
$$FEC_{C-3} = (FEC_{Eje\ Sencillo\ 1}) + (FEC_{Eje\ Tandem\ 1})$$

$$FEC_{C-3} = 0.0839 + 0.8111$$

$$FEC_{C-3} = \mathbf{0.8950}$$

Es decir que el paso de esta camioneta causa el mismo daño sobre el pavimento que el causaría un “camión virtual de 0.8950 ejes simples de cuatro ruedas, cada eje cargado con 8,2 toneladas”.

Vehículo de Carga T3 - S2



Para estimar el valor del FEC para este vehículo, se sigue el mismo procedimiento que se utilizó para calcular el FEC del vehículo de carga T3-S2 en la revisión del procedimiento utilizado por el diseñador (Ver pág. 46). Dando como resultado:

El FEC para el Eje Sencillo # 1 es de 0.0780.

El FEC para el Eje Tandem # 1 es de 0.8593.

El FEC para el Eje Tandem # 2 es de 0.7815.

Para obtener el valor del FEC del vehículo en estudio (T3 – S2) simplemente se suman los tres factores anteriormente encontrados, como se muestra a continuación:

$$FEC_{T3-S2} = (FEC_{Eje\ Sencillo\ 1}) + (FEC_{Eje\ Tandem\ 1}) + (FEC_{Eje\ Tandem\ 2})$$

$$FEC_{T3-S2} = 0.0780 + 0.8593 + 0.7815$$

$$FEC_{T3-S2} = 1.7188$$

Es decir que el paso de esta camioneta causa el mismo daño sobre el pavimento que el causaría un “camión virtual de 1.7188 ejes simples de cuatro ruedas, cada eje cargado con 8,2 toneladas”.

A continuación se presentan los valores de los FEC's para los vehículos livianos, medianos y pesados.

Tabla 17. Factores Equivalentes de Carga considerados por el Diseñador.

Vehículos	FEC's
Autos	0.0004
Jeep	0.0004
M Bus	0.0004

Tabla 18. Factores Equivalentes de Carga Calculados.

Vehículos	FEC'S				
	Eje Simple #1	Eje simple #2	Eje Tándem #1	Eje Tándem #2	Total
Pick up	0.0004	0.0012			0.0016
Bus	0.1655	0.9181			1.0836
C2 Liviano	0.0073	0.0268			0.0341
C2	0.0696	1.1886			1.2582
C3	0.0839		0.8111		0.8950
T3-S2	0.0780		0.8593	0.7815	1.7188

Los valores de los FEC's para Autos, Jeep, y Micro Bus corresponden a los valores utilizados por el diseñador, ya que nos propusimos determinar el daño causado por ejes cargados no incluidos en el diseño de pavimentos, es decir pesamos vehículos que pueden llevar exceso de carga como camionetas, buses y C2 Livianos.

Tabla 19. Factores Equivalentes de Carga para vehículos pesados utilizados por el MTI.

Vehículos	FEC's
Bus	1.91
C2	1.76
C3	2.14
T3-S2	3.48

El resultado de los ESAL´s siguiendo el Procedimiento Simplificado presentado en el Método AASHTO 1993, es:

Tabla 20. Resultado de Ejes Equivalentes de Carga para cada año del Periodo de Diseño.

<i>Categoría</i>	<i>Vehículo Liviano</i>			<i>Pesado de Pasajeros</i>		<i>Pesado de Carga</i>				<i>ESAL´s</i>	<i>Sumatoria de Ejes</i>
<i>Tipo</i>	<i>Autos</i>	<i>Jeep</i>	<i>Pick Up</i>	<i>M Bus</i>	<i>Bus</i>	<i>C2 Liv</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>T3S2</i>		
<i>Tasa</i>	5.35%	5.35%	5.35%	5.35%	5.35%	3.24%	3.24%	3.24%	3.24%		
<i>FEC</i>	0.0004	0.0004	0.00112	0.0004	1.084	0.034157	1.2582	0.895	1.7188		
<i>Año</i>	<i>FDD</i>	1	<i>FC</i>	0.5	<i>Periodo de Diseño</i>		15	<i>Días del año</i>	365		<i>Ejes Acumulados</i>
2009	80	69	315	21	94	93	81	13	55	57,227.96	57,227.96
2010	84.28	72.69	331.85	22.12	99.03	96.01	83.62	13.42	56.78	59,476.15	116,704.11
2011	88.79	76.58	349.61	23.31	104.33	99.12	86.33	13.86	58.62	61,818.25	178,522.36
2012	93.54	80.68	368.31	24.55	109.91	102.34	89.13	14.30	60.52	64,258.45	242,780.81
2013	98.54	84.99	388.02	25.87	115.79	105.65	92.02	14.77	62.48	66,801.11	309,581.92
2014	103.82	89.54	408.77	27.25	121.98	109.07	95.00	15.25	64.51	69,450.79	379,032.72
2015	109.37	94.33	430.64	28.71	128.51	112.61	98.08	15.74	66.60	72,212.29	451,245.01
2016	115.22	99.38	453.68	30.25	135.38	116.26	101.26	16.25	68.75	75,090.62	526,335.63
2017	121.39	104.69	477.95	31.86	142.63	120.02	104.54	16.78	70.98	78,091.02	604,426.65
2018	127.88	110.30	503.53	33.57	150.26	123.91	107.92	17.32	73.28	81,218.99	685,645.64
2019	134.72	116.20	530.46	35.36	158.30	127.93	111.42	17.88	75.66	84,480.30	770,125.94
2020	141.93	122.41	558.84	37.26	166.77	132.07	115.03	18.46	78.11	87,880.96	858,006.90
2021	149.52	128.96	588.74	39.25	175.69	136.35	118.76	19.06	80.64	91,427.31	949,434.21
2022	157.52	135.86	620.24	41.35	185.09	140.77	122.61	19.68	83.25	95,125.95	1044,560.15
2023	165.95	143.13	653.42	43.56	194.99	145.33	126.58	20.31	85.95	98,983.82	1,143,543.98
2024									Total	1,143,543.98	

7.4. Cálculo de los Ejes Equivalentes de Carga para el Tramo de Carretera Empalme Malpaisillo- Empalme San Isidro con datos de Factores Equivalentes utilizados por el MTI.

Tabla 21. Resultado de Ejes Equivalentes de Carga para cada año del Periodo de Diseño considerando los FEC's utilizados por el MTI.

Categoría	Vehículo Liviano			Pesado de Pasajeros		Pesado de Carga				ESAL's	Sumatoria de Ejes
Tipo	Autos	Jeep	Pick Up	M Bus	Bus	C2 Liv	C2	C3	T3S2		Ejes Acumulados
Tasa	5.35%	5.35%	5.35%	5.35%	5.35%	3.24%	3.24%	3.24%	3.24%		
FEC	0.0004	0.0004	0.001124	0.0004	1.91	0.034157	1.76	2.14	3.48		
Año	FDD	1	FC	0.5	Periodo de Diseño		15	Días del año		365	
2009	80	69	315	21	94	93	81	13	55	99,447.66	99,447.66
2010	84.28	72.69	331.85	22.12	99.03	96.01	83.62	13.42	56.78	103,362.75	202,810.40
2011	88.79	76.58	349.61	23.31	104.33	99.12	86.33	13.86	58.62	107,441.77	310,252.17
2012	93.54	80.68	368.31	24.55	109.91	102.34	89.13	14.30	60.52	111,692.00	421,944.17
2013	98.54	84.99	388.02	25.87	115.79	105.65	92.02	14.77	62.48	116,121.09	538,065.26
2014	103.82	89.54	408.77	27.25	121.98	109.07	95.00	15.25	64.51	120,737.04	658,802.30
2015	109.37	94.33	430.64	28.71	128.51	112.61	98.08	15.74	66.60	125,548.20	784,350.50
2016	115.22	99.38	453.68	30.25	135.38	116.26	101.26	16.25	68.75	130,563.37	914,913.87
2017	121.39	104.69	477.95	31.86	142.63	120.02	104.54	16.78	70.98	135,791.70	1050,705.57
2018	127.88	110.30	503.53	33.57	150.26	123.91	107.92	17.32	73.28	141,242.84	1191,948.41
2019	134.72	116.20	530.46	35.36	158.30	127.93	111.42	17.88	75.66	146,926.85	1338,875.26
2020	141.93	122.41	558.84	37.26	166.77	132.07	115.03	18.46	78.11	152,854.28	1491,729.53
2021	149.52	128.96	588.74	39.25	175.69	136.35	118.76	19.06	80.64	159,036.19	1650,765.73
2022	157.52	135.86	620.24	41.35	185.09	140.77	122.61	19.68	83.25	165,484.18	1816,249.91
2023	165.95	143.13	653.42	43.56	194.99	145.33	126.58	20.31	85.95	172,210.37	1,988,460.28
2024									Total	1,988,460.28	

VIII. CONCLUSIONES.

Una vez realizada la revisión del procedimiento en el cálculo de ejes equivalentes en el diseño de pavimentos flexibles del tramo de carretera Empalme Malpaisillo - Empalme San Isidro, pudimos comprobar que el procedimiento utilizado por el diseñador se encuentra apegado a las normas AASHTO y SIECA, las cuales son utilizadas en nuestro país por el Ministerio de Transporte e Infraestructura para el diseño de pavimentos.

En el cálculo de los ESAL's las variables más relevantes son: la composición del tráfico, las tasas de crecimiento (TC) y los factores equivalente de carga (FEC's), al realizar un análisis de éstas comprobamos que de ellas la que más influencia tiene en dicha estimación es la TC, porque al utilizar tasas de crecimiento muy elevadas para la proyección de los vehículos de carga, provoca un incremento significativo en el resultado de los ESAL's, pudiéndose apreciar en las tablas emplazadas en el Anexo B, pág. 76.

De los vehículos incluidos y no incluidos en el diagrama de cargas permisibles, se logró determinar que el eje simple correspondiente a los buses, es el que causa mayor daño a la estructura de pavimento, esto debido a que transitan por la vía presentando sobrecarga, este tipo de eje concentra la carga en un solo punto de apoyo, lo que hace que el pavimento sea sometido a una mayor concentración de esfuerzos en un punto en específico, provocando una mayor deformación.

Los valores de los FEC's para los vehículos C2, C3, T3S2, se encuentran por debajo de los considerados por el diseñador, el cual asume que dichos vehículos circulan por la vía a su máxima capacidad, como se pudo notar los vehículos no incluidos en el diagrama de cargas, circulan con una carga mayor que la establecida, sucediendo lo contrario para los vehículos de carga, que son los principales causantes del deterioro de las carreteras.

FEC Diseñador				FEC según báscula			
Bus	C2	C3	T3-S2	Bus	C2	C3	T3-S2
0.265	1.6015	1.3979	2.667	1.084	1.2582	0.895	1.7188
ESAL's: 1,387,334.89				ESAL's: 1,143,543.98			

Los registros brindados por las estaciones pesadoras no presentaron un solo vehículo de carga que exceda el peso permisible, lo que nos lleva a concluir que estos datos no son confiables para poder establecer un parámetro que indique seguridad en los resultados obtenidos.

Se determinaron unos ESAL's en donde se utilizaron factores equivalentes brindados por el MTI, estos FEC fueron obtenidos en un estudio independiente realizado en el año 2007, dichos factores se encuentran por encima de los utilizados por el diseñador, con estos factores los resultados sobrepasan en un 43.33% a los obtenidos por el diseñador, lo que nos lleva a concluir que nos encontramos en una situación de sub diseño de la vía.

FEC Diseñador				FEC estudio independiente			
Bus	C2	C3	T3-S2	Bus	C2	C3	T3-S2
0.265	1.6015	1.3979	2.667	1.91	1.76	2.14	3.48
ESAL's: 1,387,334.89				ESAL's: 1,988,460.28			

Todo lo señalado anteriormente nos demuestra la gran importancia que tiene el cálculo adecuado de los ESAL's, del cual depende en gran medida el óptimo diseño de una vía, así como la vida útil de la misma, todo esto conlleva a un ahorro significativo para el Estado, al no tener que estar invirtiendo fondos en mayor cantidad de mantenimientos de lo que realmente hubiera sido necesario ó bien el no invertir de más en la construcción de una carretera al considerar mayores ESAL's, lo que permitiría ampliar la atención a las necesidades de la red vial.

IX. RECOMENDACIONES.

- ✓ Realizar estudios de pesos por ejes cuando se va a diseñar una carretera, estos deberán hacerse en función de la importancia de la misma, debido a que los datos que se manejan en las básculas no son recopilados para fines de diseño
- ✓ Dar continuidad a los aforos vehiculares, con el fin de obtener un comportamiento más preciso del tráfico, debido a que este factor influye considerablemente en la proyección de los ESAL'S.
- ✓ Efectuar un monitoreo de los buses e incluirlos en el Diagrama de Cargas Permisibles y en los estudios de pesos por ejes, ya que ellos transitan en su mayoría sobrecargados y por ende el peso en sus ejes es mayor que el considerado al momento de realizar el diseño de las estructuras de pavimento.
- ✓ Finalizada la construcción de la carretera se recomienda monitorear el crecimiento vehicular y el de las cargas transportadas, esto con el fin de mantener un control de lo estimado en el diseño y el comportamiento que están teniendo esos aspectos en la realidad, a fin de tomar las medidas necesarias para garantizar la vida útil para la cual fue diseñada la vía.
- ✓ De ser posible que se sustituya el sistema mecánico utilizado en las básculas por un sistema electrónico el cual registra datos de pesos que no podrán ser manipulados, esto con el fin de obtener registros que puedan ser utilizados en los diseños de futuras vías.

X. BIBLIOGRAFÍA.

- ✓ AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.
American Association of State Highway and Transportation Officials. 1993.
- ✓ ALFONSO MONTEJO FONSECA.
Ingeniería de Pavimentos para Carreteras, Segunda Edición, 2002.
- ✓ CAL Y MAYOR.
Ingeniería de Transito, Sexta Edición.
- ✓ GUSTAVO CORREDOR M.
Apuntes de Pavimentos Volumen 1. Edición Octubre 2004. Revisión Octubre 2006.
- ✓ Administración e Implementación del Efectivo Control de Pesos y Dimensiones de Vehículos Automotores.
Ministerio de Transporte e Infraestructura.
- ✓ Anuarios de Aforos 2008.
Ministerio de Transporte e Infraestructura.
- ✓ Estudio de los Factores Equivalentes de Carga en el Tramo de Carretera Las Piedrecitas – Empalme Izapa. Ernesto José Cárdenas Corrales y José Alonso Jiménez Gutiérrez. Facultad de Tecnología de la Construcción. Universidad Nacional de Ingeniería. 2005.
- ✓ Estructura de Pavimento Flexible de la Carretera Acoyapa – San Carlos – frontera con Costa rica. Yelice María Darce Corrales y Róger Antonio Ampié Guevara. Facultad de Tecnología de la Construcción. Universidad Nacional de Ingeniería. 2007.



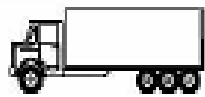
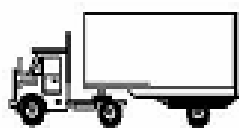








- ✓ Indicadores Estadísticos del Transporte de Cargas Controlado en las Básculas.
Ministerio de Transporte e Infraestructura.
Dirección General de Planificación.

- ✓ <http://es.metric-conversions.org/peso/toneladas-metricas-a-libras.htm>

ANEXOS

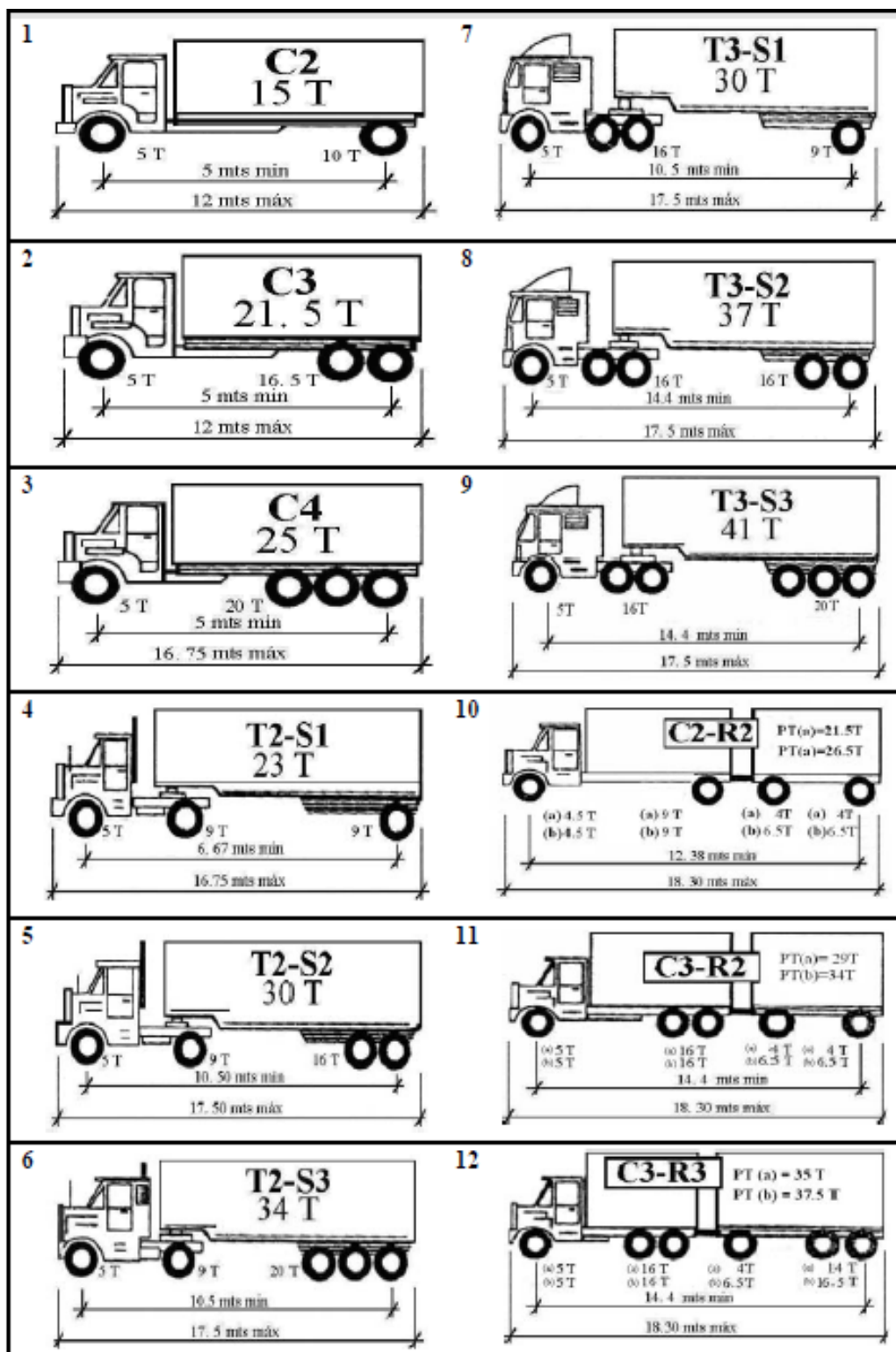
ANEXO A. TABLAS DE DATOS A UTILIZAR

Tabla A. Diagrama de Cargas Permisibles (Utilizado por el Diseñador)¹⁷.

TIPO DE VEHICULOS	ESQUEMAS DE VEHICULOS	PESO MAXIMO AUTORIZADO						
		1er. Eje	2da. Eje	3er. Eje	4to. Eje	5to. Eje	6to. Eje	Peso Máximo Total (t) Ton - Met.
C2		4.50	9.00					13.50
C3		5.00	16.00					21.00
			8.00	8.00				
C4		5.00	20.00					25.00
			6.67	6.66	6.66			
T2 - S1		5.00	9.00	9.00				23.00
T2 - S2		5.00	9.00	16.00				30.00
				8.00	8.00			
T2 - S3		5.00	9.00	20.00				34.00
				6.67	6.66	6.66		
T3 - S1		5.00	16.00		9.00			30.00
			8.00	8.00				
T3 - S2		5.00	16.00		16.00			37.00
			8.00	8.00	8.00	8.00		
T3 - S3		5.00	16.00		20.00			41.00
			8.00	8.00	6.67	6.66	6.66	
C2 - R2		4.50	9.00	4.0a	4.0a			21.50
		4.50	9.00	6.5b	6.5b			26.50
C3 - R2		5.00	16.00		4.0a	4.0a		29.00
		5.00	8.00	8.00	6.5b	6.5b		34.00
C3 - R3		5.00	16.00		4.0a	5.0a	5.0a	35.00
		5.00	8.0b	8.0b	6.5b	5.0b	5.0b	37.50

¹⁷ Fuente: Ministerio de Transporte e Infraestructura. MTI.

Tabla B. Versión Actual de Diagrama de Cargas Permisibles¹⁸.



¹⁸ Fuente: http://www.mti.gob.ni/vialidad/doc/Diagrama_Cargas_%20300908.pdf

Tabla C. Factores de Crecimientos de Tránsito¹⁹.

Período de análisis (años)	Factor sin Crecimiento	Tasa de crecimiento anual (g) (en %)						
		2	4	5	6	7	8	10
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2.0	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.0	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.0	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.0	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.0	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.0	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.0	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.0	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.0	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	11.0	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	12.0	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	13.0	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	14.0	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	15.0	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	16.0	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	17.0	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	18.0	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	19.0	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	20.0	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	25.0	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	30.0	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	35.0	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

Tabla D-20 AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, 1,993

¹⁹ Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos. SIECA. Cap. 3. Pág.25

Tabla D. Factores Equivalentes de Carga para Pavimentos Flexibles, Ejes Simples, Pt: 2.0²⁰

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.009	0.012	0.011	0.010	0.009	0.009
8	0.03	0.035	0.036	0.033	0.031	0.029
10	0.075	0.085	0.090	0.085	0.079	0.076
12	0.165	0.177	0.189	0.183	0.174	0.168
14	0.325	0.338	0.354	0.350	0.338	0.331
16	0.589	0.598	0.613	0.612	0.603	0.596
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.59	1.56	1.55	1.57	1.59
22	2.49	2.44	2.35	2.31	2.35	2.41
24	3.71	3.62	3.43	3.33	3.40	3.51
26	5.36	5.21	4.88	4.68	4.77	4.96
28	7.54	7.31	6.78	6.42	6.52	6.83
30	10.4	10.0	9.2	8.6	8.7	9.2
32	14.0	13.5	12.4	11.5	11.5	12.1
34	18.5	17.9	16.3	15.0	14.9	15.6
36	24.2	23.3	21.2	19.3	19.0	19.9
38	31.1	29.9	27.1	24.6	24.0	25.1
40	39.6	38.0	34.3	30.9	30.0	31.2
42	49.7	47.7	43.0	38.6	37.2	38.5
44	61.8	59.3	53.4	47.6	45.7	47.1
46	76.1	73.0	65.6	58.3	55.7	57.0
48	92.9	89.1	80.0	70.9	67.3	68.6
50	113.	108.	97.	86.	81.	82.

²⁰ Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos. SIECA. Cap. 3. Pág.6

Tabla E. Factores Equivalentes de Carga para Pavimentos Flexibles, Ejes Tándem, Pt: 2.0²¹

Carga p/eje (kips)	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
8	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002
10	0.007	0.008	0.008	0.007	0.006	0.006
12	0.013	0.016	0.016	0.014	0.013	0.012
14	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
16	0.041	0.048	0.050	0.046	0.042	0.040
18	0.066	0.077	0.081	0.075	0.069	0.066
20	0.103	0.117	0.124	0.117	0.109	0.105
22	0.156	0.171	0.183	0.174	0.164	0.158
24	0.227	0.244	0.260	0.252	0.239	0.231
26	0.322	0.340	0.360	0.353	0.338	0.329
28	0.447	0.465	0.487	0.481	0.466	0.455
30	0.607	0.623	0.646	0.643	0.627	0.617
32	0.810	0.823	0.843	0.842	0.829	0.819
34	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.07
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.76	1.75	1.73	1.72	1.73	1.74
40	2.22	2.19	2.15	2.13	2.16	2.18
42	2.77	2.73	2.64	2.62	2.66	2.70
44	3.42	3.36	3.23	3.18	3.24	3.31
46	4.20	4.11	3.92	3.83	3.91	4.02
48	5.10	4.98	4.72	4.58	4.68	4.83
50	6.15	5.99	5.64	5.44	5.56	5.77
52	7.37	7.16	6.71	6.43	6.56	6.83
54	8.77	8.51	7.93	7.55	7.69	8.03
56	10.4	10.1	9.3	8.8	9.0	9.4
58	12.2	11.8	10.9	10.3	10.4	10.9
60	14.3	13.8	12.7	11.9	12.0	12.6
62	16.6	16.0	14.7	13.7	13.8	14.5
64	19.3	18.6	17.0	15.8	15.8	16.6
66	22.2	21.4	19.6	18.0	18.0	18.9
68	25.5	24.6	22.4	20.6	20.5	21.5
70	29.2	28.1	25.6	23.4	23.2	24.3
72	33.3	32.0	29.1	26.5	26.2	27.4
74	37.8	36.4	33.0	30.0	29.4	30.8
76	42.8	41.2	37.3	33.8	33.1	34.5
78	48.4	46.5	42.0	38.0	37.0	38.6
80	54.4	52.3	47.2	42.5	41.3	43.0
82	61.1	58.7	52.9	47.6	46.0	47.8
84	68.4	65.7	59.2	53.0	51.2	53.0
86	76.3	73.3	66.0	59.0	56.8	58.6
88	85.0	81.6	73.4	65.5	62.8	64.7
90	94.4	90.6	81.5	72.6	69.4	71.3

²¹ Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos. SIECA. Cap. 3. Pág.7

**Tabla F. Factores Equivalentes de Carga para Pavimentos Flexibles, Ejes Tridem,
Pt: 2.0²²**

Carga p/eje (kips)	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
6	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
8	0.0009	0.0010	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007
10	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001
12	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
14	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005
16	0.010	0.012	0.012	0.010	0.009	0.009
18	0.016	0.019	0.019	0.017	0.015	0.015
20	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
22	0.034	0.042	0.042	0.038	0.035	0.034
24	0.049	0.058	0.060	0.055	0.051	0.048
26	0.068	0.080	0.083	0.077	0.071	0.068
28	0.093	0.107	0.113	0.105	0.098	0.094
30	0.125	0.140	0.149	0.140	0.131	0.126
32	0.164	0.182	0.194	0.184	0.173	0.167
34	0.213	0.233	0.248	0.238	0.225	0.217
36	0.273	0.294	0.313	0.303	0.288	0.279
38	0.346	0.368	0.390	0.381	0.364	0.353
40	0.434	0.456	0.481	0.473	0.454	0.443
42	0.538	0.560	0.587	0.580	0.561	0.548
44	0.662	0.682	0.710	0.705	0.686	0.673
46	0.807	0.825	0.852	0.849	0.831	0.818
48	0.976	0.992	1.015	1.014	0.999	0.987
50	1.17	1.18	1.20	1.20	1.19	1.18
52	1.40	1.40	1.42	1.42	1.41	1.40
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.95	1.93	1.93	1.94	1.94
58	2.29	2.27	2.24	2.23	2.25	2.27
60	2.67	2.64	2.59	2.57	2.60	2.63
62	3.10	3.05	2.98	2.95	2.99	3.04
64	3.59	3.53	3.41	3.37	3.42	3.49
66	4.13	4.05	3.89	3.83	3.90	3.99
68	4.73	4.63	4.43	4.34	4.42	4.54
70	5.40	5.28	5.03	4.90	5.00	5.15
72	6.15	6.00	5.68	5.52	5.63	5.82
74	6.97	6.79	6.41	6.20	6.33	6.56
76	7.88	7.67	7.21	6.94	7.08	7.36
78	8.88	8.63	8.09	7.75	7.90	8.23
80	9.98	9.69	9.05	8.63	8.79	9.18
82	11.2	10.8	10.1	9.6	9.8	10.2
84	12.5	12.1	11.2	10.6	10.8	11.3
86	13.9	13.5	12.5	11.8	11.9	12.5
88	15.5	15.0	13.8	13.0	13.2	13.8
90	17.2	16.6	15.3	14.3	14.5	15.2

²² Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos. SIECA. Cap. 3. Pág.8

Tabla G. Conteo Vehicular: Tramo Empalme Malpaisillo – San Isidro²³.

Año	Autos	Jeep	Cmta.	M. Bus	Bus	C2 Liv	C2	C3	T3-S2	TPDA General
2009	80	69	315	21	94	93	81	13	55	821
2008	44	57	269	18	90	72	77	13	63	703
2007	46	56	271	18	97	83	85	10	62	728
2006	56	55	287	17	96	77	78	11	56	733
2005	44	59	250	22	95	70	74	14	55	683
2004	73	73	285	23	94	75	74	11	49	757
2003	69	67	266	24	91	66	70	11	40	704

Tabla H. Cargas Permisibles para Vehículos Livianos²⁴.

Vehículos	Peso del Eje Delantero (Kg)	Peso del Eje Trasero (Kg)
Carros	1,000	1,500
Camionetas	1,250	2,400
Mbus	2,500	3,500
Bus	6,000	13,000
C2 Liviano	5,951	11,902

²³ Fuente: Ministerio de Transporte e Infraestructura. MTI.

²⁴ Fuente: Ministerio de Transporte e Infraestructura. MTI.

ANEXO B. CÁLCULOS

Tabla I. ESAL'S cambiando el TPDA conservando las mismas Tasas y FC que el Diseñador

Categoría	Vehículo Liviano			Pesado de Pasajeros		Pesado de Carga				ESAL's	Tasa de después del 2015
Tipo	Autos	Jeep	Pick Up	M Bus	Bus	C2 Liv	C2	C3	T3S2		4.5%
Tasa	3.1%	3.1%	3.1%	3.1%	3.1%	3.5%	3.5%	3.5%	3.5%		Ejes Acumulados
FEC	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.265	0.178174	1.6015	1.3979	2.667		
Año	FDD	1	FC	0.5	Periodo de Diseño		15	Días del año	365		
2009	80	69	315	21	94	93	81	13	55	61,366.24	61,366.24
2010	82.48	71.14	324.77	21.65	96.91	96.26	83.84	13.46	56.93	63,495.73	124,861.98
2011	85.04	73.34	334.83	22.32	99.92	99.62	86.77	13.93	58.92	65,699.19	190,561.17
2012	87.67	75.62	345.21	23.01	103.02	103.11	89.81	14.41	60.98	67,979.18	258,540.35
2013	90.39	77.96	355.91	23.73	106.21	106.72	92.95	14.92	63.11	70,338.37	328,878.72
2014	93.19	80.38	366.95	24.46	109.50	110.45	96.20	15.44	65.32	72,779.51	401,658.23
2015	96.08	82.87	378.32	25.22	112.90	121.11	105.48	16.93	71.62	79,451.00	481,109.23
2016	99.06	85.44	390.05	26.00	116.40	126.56	110.23	17.69	74.85	82,949.26	564,058.50
2017	102.13	88.09	402.14	26.81	120.00	132.26	115.19	18.49	78.22	86,602.56	650,661.05
2018	105.30	90.82	414.61	27.64	123.72	138.21	120.37	19.32	81.74	90,417.79	741,078.84
2019	108.56	93.63	427.46	28.50	127.56	144.43	125.79	20.19	85.41	94,402.17	835,481.01
2020	111.93	96.54	440.71	29.38	131.51	150.93	131.45	21.10	89.26	98,563.22	934,044.23
2021	115.40	99.53	454.38	30.29	135.59	157.72	137.37	22.05	93.27	102,908.83	1036,953.06
2022	118.97	102.62	468.46	31.23	139.79	164.81	143.55	23.04	97.47	107,447.21	1144,400.26
2023	122.66	105.80	482.98	32.20	144.13	172.23	150.01	24.08	101.86	112,186.94	1,256,587.21
2024									Total	1,256,587.21	

Tabla J. ESAL'S cambiando el FC utilizando el mismo TPDA y Tasas que el diseñador

Categoría	Vehículo Liviano			Pesado de Pasajeros		Pesado de Carga				ESAL's	Tasa después del 2015
Tipo	Autos	Jeep	Pick Up	M Bus	Bus	C2 Liv	C2	C3	T3S2		4.5%
Tasa	3.1%	3.1%	3.1%	3.1%	3.1%	3.5%	3.5%	3.5%	3.5%		
FEC	0.0004	0.0004	0.001124	0.0004	1.084	0.034157	1.2582	0.895	1.7188		Ejes Acumulados
Año	FDD	1	FC	0.5	Periodo de Diseño	15	Días del año	365			
2009	50	67	283	25	108	81	86	16	63	64,061.74	64,061.74
2010	51.55	69.08	291.77	25.78	111.35	83.84	89.01	16.56	65.21	66,218.16	130,279.90
2011	53.15	71.22	300.82	26.57	114.80	86.77	92.13	17.14	67.49	68,447.40	198,727.30
2012	54.80	73.43	310.14	27.40	118.36	89.81	95.35	17.74	69.85	70,751.93	269,479.22
2013	56.49	75.70	319.76	28.25	122.03	92.95	98.69	18.36	72.29	73,134.28	342,613.51
2014	58.25	78.05	329.67	29.12	125.81	96.20	102.14	19.00	74.82	75,597.11	418,210.62
2015	60.05	80.47	339.89	30.03	129.71	105.48	111.99	20.84	82.04	81,255.16	499,465.78
2016	61.91	82.96	350.43	30.96	133.73	110.23	117.03	21.77	85.73	84,551.24	584,017.03
2017	63.83	85.54	361.29	31.92	137.88	115.19	122.30	22.75	89.59	87,984.48	672,001.50
2018	65.81	88.19	372.49	32.91	142.15	120.37	127.80	23.78	93.62	91,560.69	763,562.19
2019	67.85	90.92	384.04	33.93	146.56	125.79	133.56	24.85	97.84	95,285.95	858,848.14
2020	69.95	93.74	395.94	34.98	151.10	131.45	139.57	25.97	102.24	99,166.61	958,014.75
2021	72.12	96.64	408.22	36.06	155.79	137.37	145.85	27.13	106.84	103,209.27	1061,224.03
2022	74.36	99.64	420.87	37.18	160.62	143.55	152.41	28.36	111.65	107,420.84	1168,644.87
2023	76.66	102.73	433.92	38.33	165.59	150.01	159.27	29.63	116.67	111,808.51	1,280,453.38
2024									Total	1,280,453.38	

Tabla K. ESAL'S cambiando las Tasas, conservando el TPDA y los FC del Diseñador

Categoría	Vehículo Liviano			Pesado de Pasajeros		Pesado de Carga				ESAL's	Tasa de después del 2015
Tipo	Autos	Jeep	Pick Up	M Bus	Bus	C2 Liv	C2	C3	T3S2		4.5%
Tasa	5.35%	5.35%	5.35%	5.35%	5.35%	3.24%	3.24%	3.24%	3.24%		Ejes Acumulados
FEC	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.265	0.178174	1.6015	1.3979	2.667		
Año	FDD	1	FC	0.5	Periodo de Diseño	15	Dias del año	365			
2009	50	67	283	25	108	81	86	16	63	67,769.28	67,769.28
2010	52.68	70.58	298.14	26.34	113.78	83.62	88.79	16.52	65.04	70,075.86	137,845.14
2011	55.49	74.36	314.09	27.75	119.87	86.33	91.66	17.05	67.15	72,463.11	210,308.25
2012	58.46	78.34	330.89	29.23	126.28	89.13	94.63	17.61	69.32	74,933.96	285,242.22
2013	61.59	82.53	348.60	30.79	133.03	92.02	97.70	18.18	71.57	77,491.45	362,733.66
2014	64.88	86.95	367.25	32.44	140.15	95.00	100.86	18.77	73.89	80,138.73	442,872.40
2015	68.36	91.60	386.90	34.18	147.65	98.08	104.13	19.37	76.28	82,879.09	525,751.49
2016	72.01	96.50	407.59	36.01	155.55	101.26	107.51	20.00	78.75	85,715.94	611,467.43
2017	75.87	101.66	429.40	37.93	163.87	104.54	110.99	20.65	81.31	88,652.81	700,120.24
2018	79.92	107.10	452.37	39.96	172.64	107.92	114.59	21.32	83.94	91,693.37	791,813.61
2019	84.20	112.83	476.58	42.10	181.87	111.42	118.30	22.01	86.66	94,841.45	886,655.06
2020	88.71	118.87	502.07	44.35	191.60	115.03	122.13	22.72	89.47	98,101.01	984,756.07
2021	93.45	125.22	528.93	46.73	201.85	118.76	126.09	23.46	92.37	101,476.17	1086,232.24
2022	98.45	131.92	557.23	49.23	212.65	122.61	130.17	24.22	95.36	104,971.20	1191,203.44
2023	103.72	138.98	587.04	51.86	224.03	126.58	134.39	25.00	98.45	108,590.56	1,299,794.00
2024									Total	1,299,794.00	

Tabla L. ESAL'S Conservando TPDA, cambiando FC-Tasas

Categoría	Vehículo Liviano			Pesado de Pasajeros		Pesado de Carga				ESAL´s	Tasa de después
Tipo	Autos	Jeep	Pick Up	M Bus	Bus	C2 Liv	C2	C3	T3S2		del 2015
Tasa	5.35%	5.35%	5.35%	5.35%	5.35%	3.24%	3.24%	3.24%	3.24%		4.5%
FEC	0.0004	0.0004	0.001124	0.0004	1.084	0.034157	1.2582	0.895	1.7188		Ejes Acumulados
Año	FDD	1	FC	0.5	Periodo de Diseño		15	Dias del año	365		
2009	50	67	283	25	108	81	86	16	63	64,061.74	64,061.74
2010	52.68	70.58	298.14	26.34	113.78	83.62	88.79	16.52	65.04	66,589.59	130,651.33
2011	55.49	74.36	314.09	27.75	119.87	86.33	91.66	17.05	67.15	69,223.55	199,874.88
2012	58.46	78.34	330.89	29.23	126.28	89.13	94.63	17.61	69.32	71,968.34	271,843.22
2013	61.59	82.53	348.60	30.79	133.03	92.02	97.70	18.18	71.57	74,828.91	346,672.13
2014	64.88	86.95	367.25	32.44	140.15	95.00	100.86	18.77	73.89	77,810.46	424,482.59
2015	68.36	91.60	386.90	34.18	147.65	98.08	104.13	19.37	76.28	80,918.41	505,401.01
2016	72.01	96.50	407.59	36.01	155.55	101.26	107.51	20.00	78.75	84,158.46	589,559.47
2017	75.87	101.66	429.40	37.93	163.87	104.54	110.99	20.65	81.31	87,536.57	677,096.03
2018	79.92	107.10	452.37	39.96	172.64	107.92	114.59	21.32	83.94	91,058.97	768,155.00
2019	84.20	112.83	476.58	42.10	181.87	111.42	118.30	22.01	86.66	94,732.21	862,887.22
2020	88.71	118.87	502.07	44.35	191.60	115.03	122.13	22.72	89.47	98,563.15	961,450.36
2021	93.45	125.22	528.93	46.73	201.85	118.76	126.09	23.46	92.37	102,558.95	1064,009.31
2022	98.45	131.92	557.23	49.23	212.65	122.61	130.17	24.22	95.36	106,727.14	1170,736.45
2023	103.72	138.98	587.04	51.86	224.03	126.58	134.39	25.00	98.45	111,075.60	1,281,812.06
2024									Total	1,281,812.06	